

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»  
(СГУГиТ)

# **ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ**

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

**«ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ  
ЗЕМЛИ И ФОТОГРАММЕТРИЯ, МОНИТОРИНГ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

Т. 2

Сборник материалов

Новосибирск  
СГУГиТ  
2018

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры  
фотограмметрии и дистанционного зондирования СГУГиТ, Новосибирск  
*А. П. Гук*

Доктор физико-математических наук, и.о. зав. лабораторией  
математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере  
Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск  
*Г. А. Платов*

Доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией  
обработки изображений Института вычислительной математики  
и математической геофизики СО РАН, Новосибирск  
*В. П. Пяткин*

Доктор технических наук, зав. кафедрой  
фотограмметрии и дистанционного зондирования СГУГиТ, Новосибирск  
*А. В. Комиссаров*

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля  
2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зон-  
дирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, гео-  
экология» : сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 332 с.

В сборнике опубликованы материалы XIV Международного научного конгресса «Ин-  
терэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции «Дис-  
танционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей  
среды, геоэкология» (секции «Современные методы анализа, обработки, интерпретации  
и визуализации геопространственных данных по материалам аэрокосмических, лидарных,  
радарных, тепловых, спектрональных и гравиметрических съемок», «Мониторинг  
Земли: технологии, алгоритмическое и программное обеспечение обработки и анализа  
данных дистанционного зондирования», «Мониторинг и математическое моделирование  
процессов в атмосфере, гидросфере и литосфере Земли»).

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 502:528.7

© СГУГиТ, 2018

## **ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАВЕРНОЗНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ**

*Александр Александрович Якименко*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой вычислительной техники, тел. (923)225-20-15, e-mail: yakimenko@corp.nstu.ru

*Дмитрий Алексеевич Караваев*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (913)471-22-67, e-mail: kda@opg.sccc.ru

*Антон Евгеньевич Морозов*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, магистрант, тел. (906)906-17-95, e-mail: tony-morozov@mail.ru

В данной статье предлагается подход к решению обратной задачи геофизики – определение положения объекта (каверны) и его геометрических параметров, по картине распространения волнового поля. В настоящее время не существует быстрых и точных методов определения искомым данным. В работе предлагается метод на основе нейронных сетей (НС), представлена возможная архитектура НС а также приведены результаты проведенных экспериментов по ее реализации и обучению. Полученная в результате экспериментов модель показывает наличие «понимания» входных данных, демонстрируя ответы, приближенные к оригиналу. В ответах НС можно выделить зависимость между качеством ответа сети и количеством волн, прошедших через искомый объект среды.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, каверна, обратная задача геофизики, прямая задача геофизики, численное моделирование.

## **THE EXPERIENCE OF USING A NEURON NETWORK FOR THE DETERMINATION OF LOCATION AND GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF CUVERNESS INCLUSIONS**

*Alexander A. Yakimenko*

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Associate Professor, Head of Department of Computer Engineering, phone: (923)225-20-15, e-mail: yakimenko@corp.nstu.ru

*Dmitry A. Karavaev*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (913)471-22-67, e-mail: kda@opg.sccc.ru

*Anton E. Morozov*

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate, phone: (906) 906-17-95, e-mail: tony-morozov@mail.ru

In this paper, we propose an approach to the solution of the inverse problem of geophysics—the determination of the position of the object (cavity) and its geometric parameters, from the picture of the propagation of the wave field. At present, there are no fast and accurate methods for determining the data sought. The paper proposes a method based on neural networks (NA), presents a possible architecture of the National Assembly, and presents the results of experiments on its implementation and training. The model obtained as a result of the experiments shows the presence of an "understanding" of the input data, demonstrating the answers that are close to the original. In the NA answers, one can single out the relationship between the quality of the network response and the number of waves that have passed through the desired medium object.

**Key words:** neural network, cavern, inverse geophysical problem, direct geophysical problem, numerical simulation.

В настоящее время не существует быстрых и точных инструментов, позволяющих решить обратную задачу геофизики. Под обратной задачей понимается задача определения строения и параметров исследуемой среды по имеющейся картине распространения волнового поля [1]. Одним из существующих подходов к решению обратных задач является итеративный метод: посредством постепенного изменения задаваемых в специальной программе параметров среды синтезируется картина распространения волнового поля для заданной среды и сравнивается с имеющейся. Затем параметры изменяются в сторону предполагаемого оптимума – набора параметров среды, соответствующих снятой картине поля. В результате многократного повторения заданной операции можно приблизиться к искомым значениям параметров. Данный подход требует больших затрат времени на моделирование и сравнение картин полей. Время моделирования, в зависимости от точности и детализации модели, может достигать нескольких дней даже на мощных суперкомпьютерах [2].

Для решения задачи определения положения и геометрических свойств объектов предлагается использовать нейронные сети, зарекомендовавшие себя в различных сферах от распознавания изображений до обработки временных рядов. Предполагается, что использование правильно обученных нейросетевых структур позволит получить модели, требующие малых временных затрат на обработку и позволяющих довольно точно определить местоположение и форму искомого включения (далее рассматриваем на примере кавернозных сред) - каверны.

В данной статье предлагается использование НС для определения структуры исследуемой геолого-физической модели среды (ГФМС), заданной в виде двухмерного изображения. На изображении представлена однородная среда с имеющейся в произвольной точке каверной – полостью круглой либо овальной формы (в представленной статье) с произвольными размерами. Для каждой такой гфмс была предварительно решена прямая задача, по результатам решения которой и предполагается восстановить искомую среду.

В качестве входных данных для нейронной сети выступает картина распространения волнового поля по заданной среде в виде последовательности

цветных двухмерных изображений. Снимки выполнены через равные промежутки времени.

Выходными данными для сети должна стать предполагаемая ГФМС, представленная в виде цветного двухмерного изображения, на котором происходило решение прямой задачи.

Стоит отметить, что бывают ситуации, в которых до каверны доходит малое количество сигнала. В этом случае НС гораздо труднее распознать каверну на входных данных.

При проектировании НС использовались архитектуры сетей, зарекомендовавшие себя в решении различных задач. В силу необходимости обработки изображений было решено использовать сверточную нейронную сеть (СНС) [1]. Данный вид сетей позволяет получать модели высокой точности при решении задач классификации и детектирования объектов на изображении. В качестве демонстрации эффективности СНС можно привести результаты экспериментов по распознаванию рукописных цифр на примере базы MNIST. С их помощью была достигнута точность распознавания в 99.77%.

Так как в качестве входных данных выступает последовательность изображений, то было выдвинуто предположение о возможности выделения неких зависимостей, характеризующих каверну. В данном случае выбор пал на использование LSTM-сети в качестве определителя наличия зависимостей [2]. Эта сеть зарекомендовала себя в решении задач обработки временных рядов и изображений, анализе звука, обработки языка и многих других задачах, связанных с различного рода последовательностями.

В качестве возможной архитектуры предлагается использовать СНС для преобразования входных изображений в числовой вектор, характеризующий входные данные. Данный участок НС планируется использовать в качестве «извлекателя особенностей», уникальным образом характеризующего каждую картину с помощью вектора. Далее последовательность получившихся векторов должна поступать на LSTM слой для выявления в них зависимостей. После получения некоторого ответа от LSTM-слоя необходимо его интерпретировать в изображение среды, похожее на оригинал. Для этого предлагается использовать НС с разверткой – операцию, схожую со сверткой в СНС, однако входной вектор постепенно разворачивается в цветное изображение заданной среды (рис. 1).

Для реализации «извлекателя особенностей» предлагается обучить полносверточную нейронную сеть на повторение своего же входа. Данная сеть будет представлять с собой свертку от размеров входного изображения до размеров необходимого вектора и развертку от формы вектора до размеров входного изображения. Предполагается, что НС, обучившаяся на воспроизведение своего входа с учетом ее архитектуры способна наиболее точным образом описать входное изображение числовым вектором в своем центре. В дальнейшем предполагается использование только сверточной части обученного «извлекателя особенностей» для преобразования входных изображений в вектора чисел.

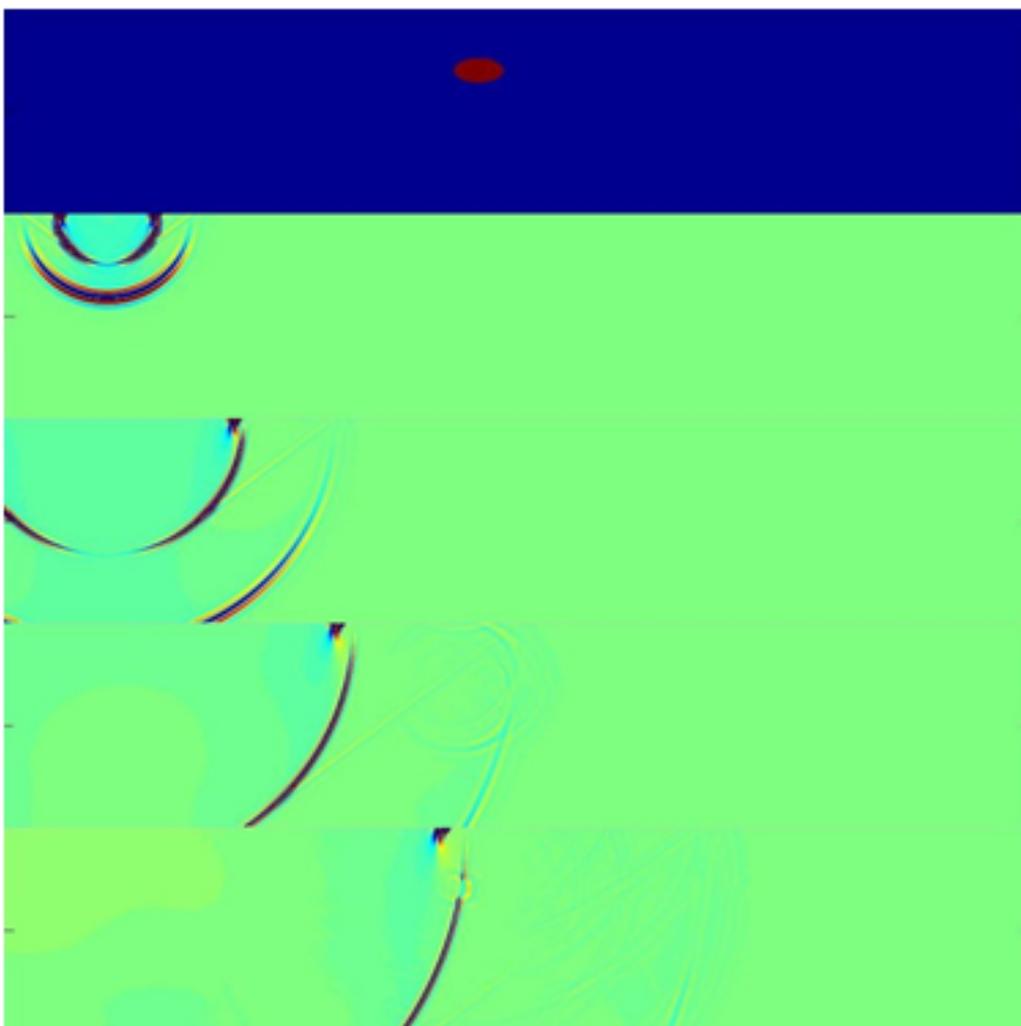


Рис. 1. Заданная структура среды и снимки распространения волнового поля.  
На первом рисунке каверна изображена в виде овала красного цвета.  
На последующих изображениях изображены волны, распространяющиеся  
от источника сигнала и проходящие через каверну

Следующая часть представляет собой композицию из LSTM-слоя, полносвязного слоя и генератора изображений, по сути являющейся «разверткой» нейронной сети. В качестве входных данных для данного блока НС выступает последовательность векторов, сформированная «извлекателем особенностей» по нескольким кадрам распространения волнового поля. В качестве выходных данных для обучения используются искомые картины сред.

Для обучения обеих частей НС планируется использование в качестве метрики потерь среднеквадратичную ошибку.

В качестве эксперимента планируется обучение полученной архитектуры и последующее её тестирование на имеющихся данных. Реализация НС планируется с помощью языка Python и библиотеки Tensorflow. Для работы с изображениями используется библиотека OpenCV. Для рисования графиков функций потерь используется инструмент Tensorboard.

В результате обучения был получен «извлекатель особенностей» с довольно высокой точностью воспроизводивший входные данные (рис. 2). Для преобразования картин распространения волн в последовательность числовых векторов была использована сверточная часть обученного «извлекателя». После чего, было произведено преобразование всех картин.



Рис. 2. График функции потерь, полученный в процессе обучения основной части НС, ответственной за воспроизведение изображения каверны

После преобразования картин было выполнено обучение основной части НС, где в качестве входных данных выступали последовательности векторов, а в качестве выходных — искомые модели. В результате была получена обученная модель НС, способная воспроизводить структуру среды по набору числовых векторов, соответствующих последовательности картин распространения волнового поля.

По полученным результатам можно сказать, что реализованная модель довольно точно определяет геометрическую форму и положение каверны. Были получены сопоставимые результаты, как для круглых каверн, так и для каверн овальной формы и разных размеров.

На рис. 3 видно, что модель научилась довольно точно распознавать параметры среды по картинам распространения волн.

Стоит также отметить, что для некоторых заданных сред НС не могла довольно точно восстановить каверну (рис. 4). Анализируя входные данные можно было заметить, что каверна была расположена довольно далеко от источника сигнала, и таким образом только малая часть сигнала смогла достичь каверны.

В работе продемонстрирована возможность применения инструментария нейронных сетей для решения обратных задач геофизики в области определения положения и геометрической формы объектов на примере кавернозных сред. Для получения более точных результатов необходимо обучение нейронной сети на большом количестве входных данных (минимум 100 различных ГФМС и соответствующих им решений прямой задачи геофизики). В дальнейшем планируется обучить НС для определения сложнопостроенных ГФМС и разработать алгоритм для избавления от «фантомных» объектов.

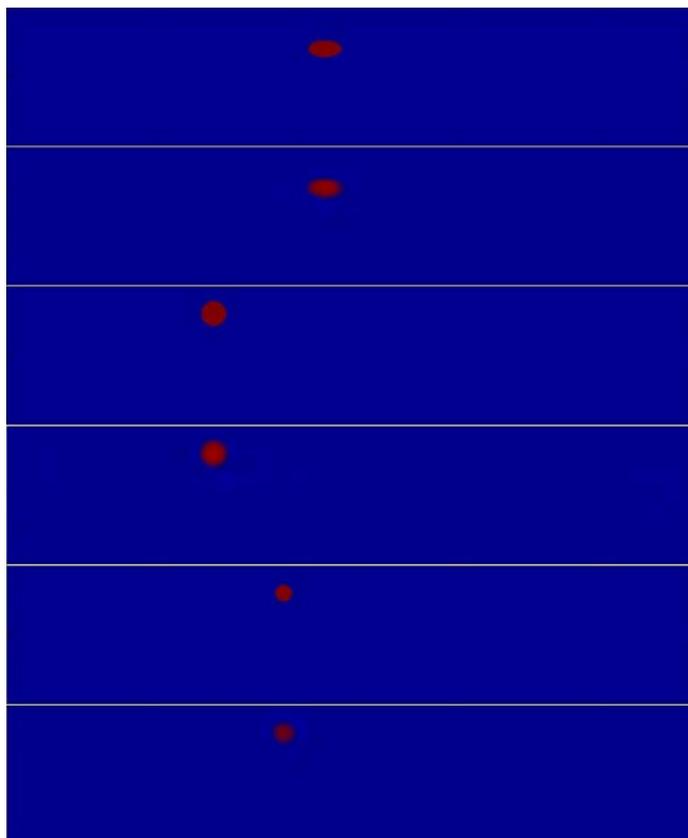


Рис. 3. Примеры искомым моделей сред и ответов полученной НС

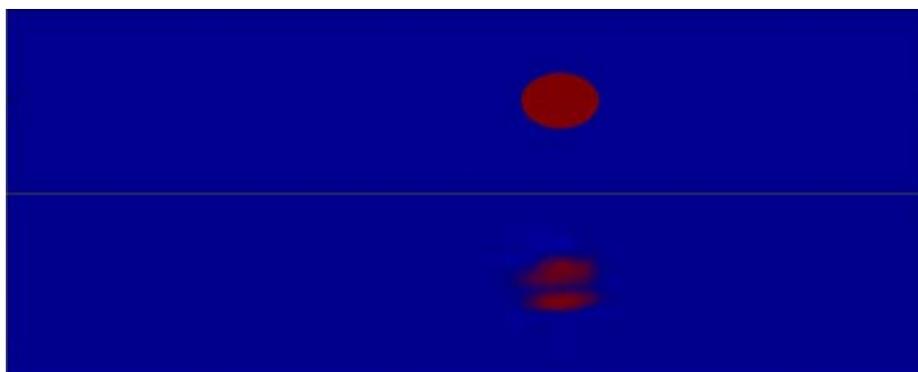


Рис. 4. Пример восстановления структуры среды с помощью НС, заданной входными данными с основной частью сигнала не достигающим каверны – определение «фантомного» объекта

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Якименко А.А. Численное моделирование распространения упругих волн в средах с подземными полостями на суперЭВМ/Якименко А.А., Караваев Д.А.//Научный вестник НГТУ. -2013, №2. -с.99-104.
2. Khairtdinov M.S., etc. Algorithms and methods for the numerical simulation of seismic wave fields in cavernous zones//Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics, 2010. -№ 13 -P. 71 -78.

3. Иванюшкин Н.А. Об использовании LSTM сети и модели SEQ2SEQ в диалоговых системах / Иванюшкин Н.А., Гаврилов А.В. // В сборнике: Робототехника и искусственный интеллект Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 2017. - С. 216-220.

4. Малявко А. А. Импульсная нейронная сеть на основе модели "ключ-порог" = Spiking neural network based on "key-threshold" model / А. А. Малявко, А. В. Гаврилов // Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний: методы и средства = Intellectual analysis of signals, data and knowledge: methods and means : сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 14-17 окт. 2017 г. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. - С. 325–330. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-3393-5.

© А. А. Якименко, Д. А. Караваев, А. Е. Морозов, 2018

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ**

*Андрей Павлович Григорюк*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: and@opg.sccc.ru

*Валерий Викторович Ковалевский*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор наук, заместитель директора, тел. (383)330-71-96, e-mail: kovalevsky@sccc.ru

*Людмила Петровна Брагинская*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий программист, тел. (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sccc.ru

В работе представлены результаты исследования параметров поляризации сейсмических волн в ходе вибросейсмического мониторинга Байкальской рифтовой зоны. Установлена связь параметров поляризации с вариациями напряженного состояния геологической среды, вызванными землетрясением.

**Ключевые слова:** вибросейсмический мониторинг, сейсмическая анизотропия, поляризация сейсмических волн.

## **STUDY OF POLARIZATION OF SEISMIC WAVES DURING THE VIBROSEISMIC MONITORING**

*Andrey P. Grigoruk*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: and@opg.sccc.ru

*Valeriy V. Kovalevsky*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Deputy Director, phone: (383)330-71-96, e-mail: kovalevsky@sccc.ru

*Ludmila P. Braginskaya*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Lead Programmer, phone: (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sccc.ru

The paper presents the results of studying the polarization parameters of seismic waves during the vibroseismic monitoring of the Baikal rift zone. The relationship between the polarization parameters and the variations in the stress state of the geological environment caused by the earthquake is established.

**Key words:** vibroseismic monitoring, seismic anisotropy, polarization of seismic waves.

## *Введение*

В Сибирском отделении РАН совместными усилиями институтов ИНГГ СО РАН, ИВМиМГ СО РАН, ГС СО РАН, ГИН СО РАН проводятся исследования по развитию методов активной сейсмологии, в частности, созданию метода вибросейсмического мониторинга сейсмоопасных зон [1].

В отличие от взрывных источников, имеющих дополнительные ограничения по экологическим воздействиям, мощные низкочастотные вибрационные источники типа ЦВ-100 характеризуются высокой стабильностью параметров излучаемых ими сейсмических волн, которая обеспечивается компьютерными системами управления. Возможности вибрационных сейсмических источников позволяют реализовать методы мониторинга свип-сигналом в диапазоне 6.5–10 Гц и монохроматического излучения для обнаружения малых изменений характеристик среды. Построение рядов наблюдений, таких как времена вступления волн и их отношения, разность времен вступления волн, динамических характеристик волн (амплитуд, параметров поляризации, углов выхода) и др., определяемых напряженно-деформированным состоянием среды, позволяет осуществлять постоянный контроль за реологическими свойствами среды.

Результаты сейсмических исследований на Урале [2] и на Сахалине [3] показали, что волновым полям, возбуждаемым при промышленных взрывах и землетрясениях, свойственна изменчивость кинематических и поляризационных характеристик, обусловленная азимутальной анизотропией упругих свойств земной коры. При этом наиболее чувствительными к анизотропии оказываются сдвиговые волны. Согласно современным представлениям одной из вероятных причин сейсмической анизотропии в земной коре является линейная упорядоченность, возникающая в трещиноватой среде под действием ориентированных тектонических напряжений [4]. Следовательно, наблюдая за вариациями параметров поляризации сейсмических волн, проходящих через очаговую область и ее окрестности, можно получать информацию о происходящих изменениях параметров деформируемой среды и ее напряженного состояния.

В настоящей работе исследовались вариации параметров поляризации сейсмических волн в ходе вибросейсмического мониторинга Байкальской рифтовой зоны с использованием виброисточника ЦВО-100, расположенного в окрестностях г. Бабушкин [5]. Для анализа использовались трехкомпонентные сейсмограммы, зарегистрированные сейсмостанцией Тырган (ТИГ) при излучении свип-сигналов за период с 2004 по 2006 год. Трасса «Вибратор-Тырган» протяженностью 109 км пересекает под острым углом (15 градусов) Боргой-Бугульдейский тектонический разлом (рис. 1).

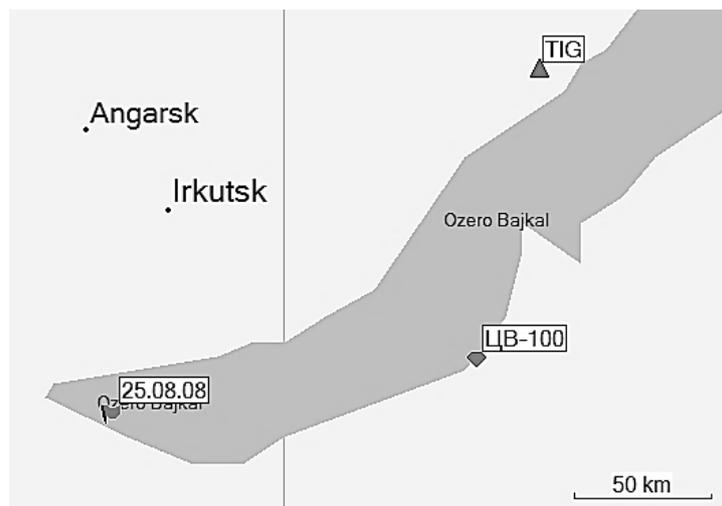


Рис. 1. Трасса «Вибратор-Тырган»

### *Методы и материалы*

Анализ поляризации волн производился по трёхкомпонентным вибрационным сейсмограммам (корелограммам).

Пример вибрационной сейсмограммы приведен на рис. 2. Внизу показана область S-волн, которые использовались для поляризационного анализа. Вертикальными линиями выделен интервал длительностью 0.2 сек, в котором проводились измерения.

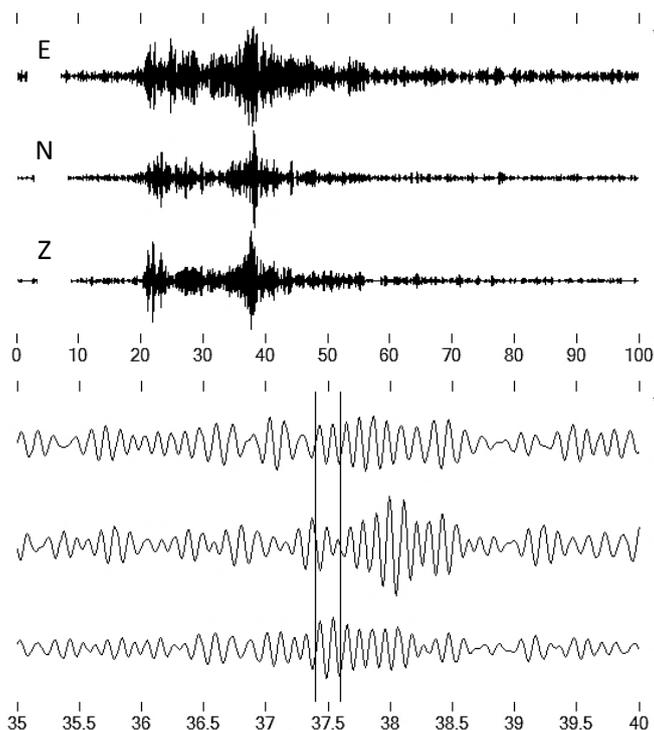


Рис. 2. Пример вибрационной сейсмограммы

Распределение векторов поляризации в пространстве (эллипсоид поляризации) строилось с помощью матрицы ковариации компонент [6]. Данные в заданном временном окне можно представить как набор точек, или радиус-векторов  $\vec{x}_i \equiv (x_i, y_i, z_i)$ , и поставить задачу найти направление, задаваемое единичным вектором  $\vec{p} \equiv (p_x, p_y, p_z)$  поляризации, такое, чтобы сумма квадратов расстояний всех точек от прямой, проведённой в этом направлении, была бы минимальна. Собственные числа и собственные векторы матрицы ковариации исходных данных определяются из уравнения

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Определяемым из (1) вектором поляризации является собственный вектор  $\vec{p}_1$  ковариационной матрицы, соответствующий максимальному собственному числу. Два других собственных вектора,  $\vec{p}_2$  и  $\vec{p}_3$ , дают два ортогональных направления. Соответствующие векторам собственные числа  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$  показывают отклонение поляризации от линейной. Коэффициент эллиптичности определяется из выражения

$$e = \sqrt{\frac{3\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}}. \quad (2)$$

Направление главной оси эллипсоида поляризации определяется по компонентам вектора  $\vec{p}_1$ . Азимут в горизонтальной плоскости

$$\Phi = \arctan\left(\frac{p_{1y}}{p_{1x}}\right) \quad (3)$$

и угол выхода (отклонение от вертикали)

$$\Theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{p_{1x}^2 + p_{1y}^2}}{p_{1z}}\right). \quad (4)$$

Полученные в соответствии с (3) значения углов поляризации для азимутальной плоскости NE приведены на графике рис. 3, а для вертикальных плоскостей NZ и EZ на рис. 4.

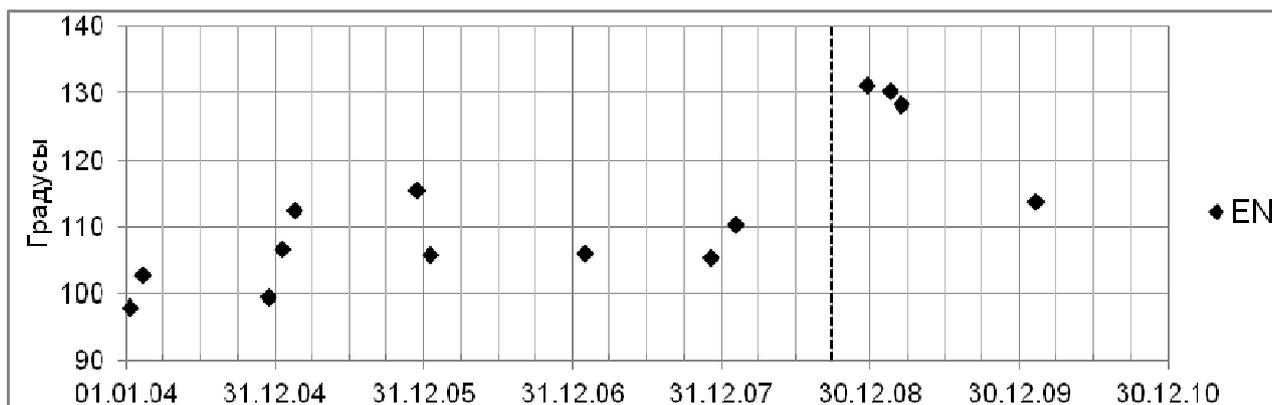


Рис. 3. Значения углов поляризации в азимутальной плоскости

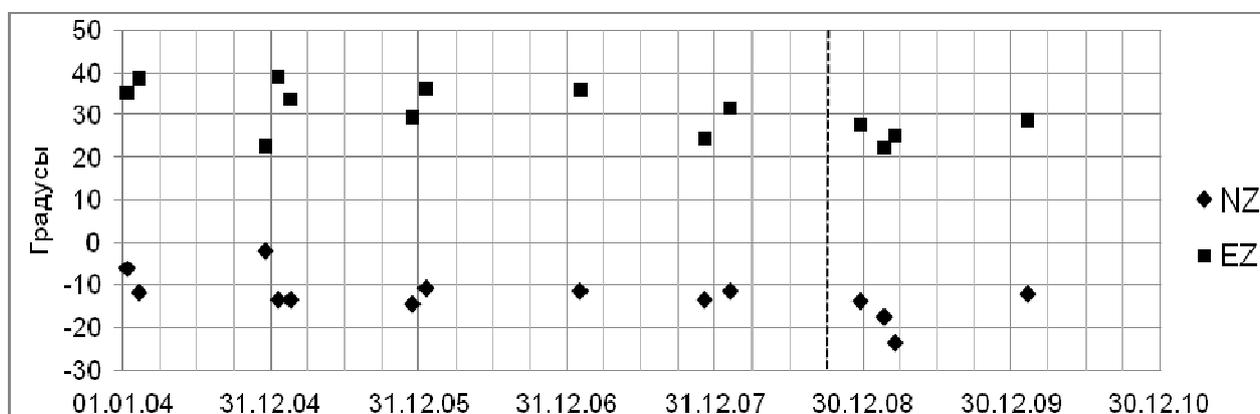


Рис. 4. Значения углов поляризации в вертикальных плоскостях (углы выхода)

На графиках представлены результаты измерений только для зимних сеансов зондирования, во время которых параметры излучения более стабильны из-за промерзания почвы под сейсмовибратором. Вертикальной пунктирной линией отмечена дата, соответствующая Култукскому землетрясению 27 августа 2008 года. Это землетрясение энергетического класса 15.9 является самым мощным в Байкальской рифтовой зоне за рассматриваемый период времени. Эпицентр землетрясения отмечен на карте рис. 1.

На рис. 5 показаны примеры полярограмм для трехкомпонентных вибрационных сейсмограмм, зарегистрированных в периоды до и после Култукского землетрясения. Справа от каждой полярограммы приведены углы поляризации и коэффициенты эллиптичности, рассчитанные по формулам (2) и (3).

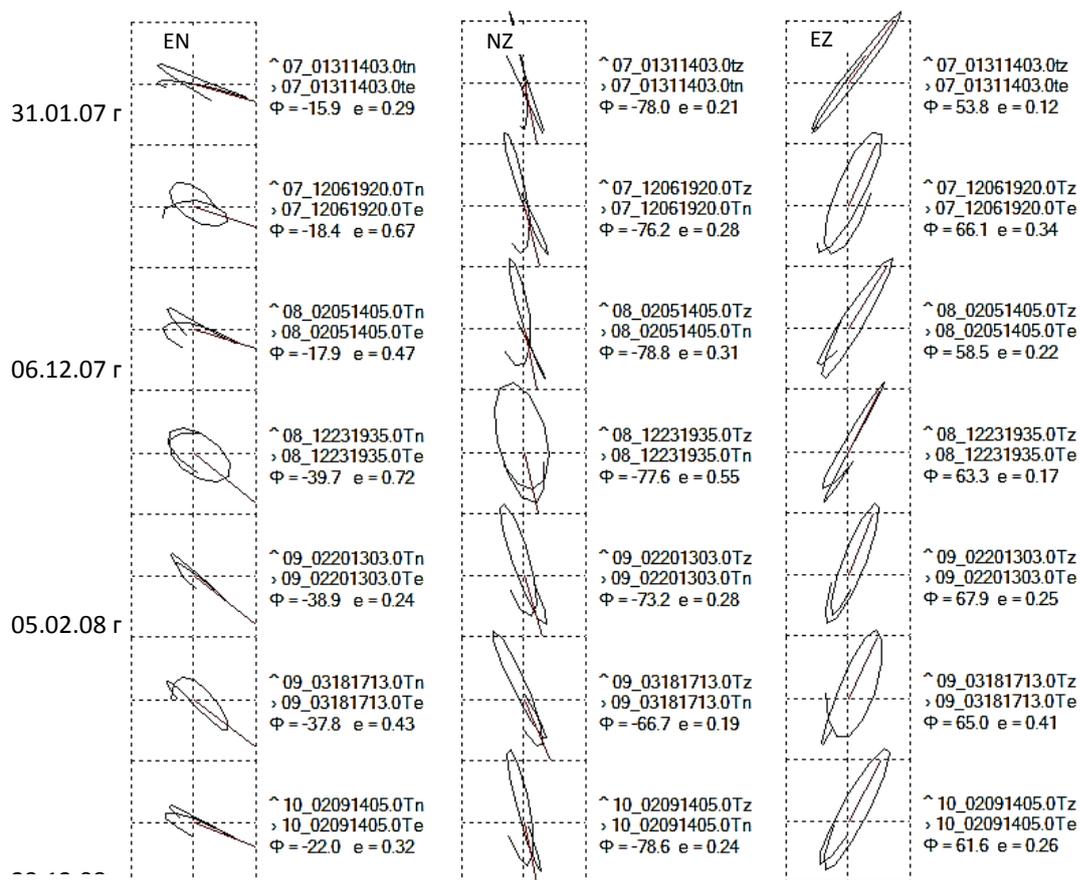


Рис. 5. Примеры полярограмм

### Обсуждение

На графике рис. 4 видно, что значения угла поляризации в горизонтальной плоскости в период до землетрясения изменяется в диапазоне  $106 \pm 7$  градусов. Направление, перпендикулярное главной оси поляризационного эллипса в горизонтальной плоскости соответствует азимуту сейсмостанции – вибратор, что является признаком поперечной волны. Сразу после землетрясения 27.08.08 г. угол поляризации скачком увеличился на 22 градуса, а затем возвратился к исходному значению в течение приблизительно одного года.

На полярограммах рис. 5 можно наблюдать изменение угла поляризации в плоскости NE после землетрясения с последующим возвратом к первоначальным значениям. В вертикальных плоскостях NZ и EZ вариации угла поляризации не коррелируют с землетрясением. Коэффициент эллиптичности в плоскостях NE и NZ в среднем возрастает в периоды непосредственно перед и после землетрясения.

Можно предположить, что вариации поля напряжений в результате землетрясения вызвали изменения анизотропных свойств среды, что отразилось на параметрах поляризации сейсмических волн.

## **Выводы**

1. В работе исследованы поляризационные параметры трехкомпонентных вибрационных сейсмограмм, зарегистрированных сейсмостанцией Тырган на расстоянии 109 км от вибратора ЦВ-100. Сейсмограммы регистрировались в ходе вибросейсмического мониторинга Байкальской рифтовой зоны на протяжении 2004 – 2010 гг.

2. Установлена связь вариаций параметров поляризации сейсмических волн, возбуждаемых мощным сеймовибратором с изменениями поля напряжений среды в результате землетрясения.

3. Полученный результат позволяет положительно оценивать перспективы мониторинга напряженного состояния геологической среды по вариациям поляризации сейсмических волн, возбуждаемых мощными сейсмическими вибраторами.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками // Отв.ред. Г.М. Цибульчик. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео» Издательства СО РАН, 2004.

2. Кашубин С.Н. Сейсмическая анизотропия и эксперименты по ее изучению на Урале и Восточно-Европейской платформе // Екатеринбург: УрО РАН. – 2001. – 182 с.

3. Лунева М.Н., Сафонов Д.А. Сейсмическая анизотропия под Южным Сахалином по параметрам S-волн от местных глубокофокусных землетрясений // Тихоокеанская геология. – 2009. – Т. 28. – № 5. – С. 96-106

4. Crampin S. Seismic wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic // Geophys. J. R. astr. Soc. – 1978. – V. 3. P. 67-496.

5. Татьков Г.И., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д., Толочко В.В., Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Вибросейсмические исследования литосферы Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий // Отечественная геология. – 2013. – № 3. С. 16–23

6. Jurkevics A. Polarization analysis of three-component array data. Bulletin of the Seismological Society of America, – 1988. – 78(5), p.1725–1743

© А. П. Григорюк, В. В. Ковалевский, Л. П. Брагинская, 2018

## **МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ МЕГАСТРУКТУР ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

*Анна Владленовна Михеева*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-60-46, e-mail: Anna@omzg.sscs.ru

*Игорь Иванович Калинин*

Институт Физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, 123242, Россия, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (916)930-97-37, e-mail: I-Kalinn@yandex.ru.

Продемонстрированы возможности специализированной базы данных природных катастроф Земли (GIS-ENDDB) на основе цифровых моделей топографической и геофизической информации по выявлению новых мегаструктур и выбору реальных природных геотектонических объектов из множества полученных формализованными алгоритмами, в частности, алгоритмом поиска сейсмолинеамента по большому кругу Земли.

**Ключевые слова:** геодинамические программы и системы, базы данных землетрясений, геотехнологии, геофизические аномалии.

## **METHODS OF GEODYNAMIC MEGASTRUCTURES DETECTING ON GEOPHYSICAL DATA**

*Anna V. Mikheeva*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-60-46, e-mail: Anna@omzg.sscs.ru

*Igor I. Kalinnikov*

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 10, B. Gruzinskaya St., Moscow, 123242, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (916)930-97-37, e-mail: i-kalinn@yandex.ru

The possibilities of a specialized database of natural disasters of the Earth (GIS-ENDDB) based on digital models of topographic and geophysical information on the detection of new megastructures and the selection of real natural geotectonic objects from the set obtained by formalized algorithms, in particular, the seismolineament search algorithm for a Large Circle of the Earth.

**Key words:** Geodynamical systems, earthquakes databases, geophysical anomalies.

### ***Введение***

Специализированная база данных GIS-ENDDB (the Geoinformation System Earth's Natural Disasters Database) [1, 2] кроме каталогов сейсмичности (мировых и региональных, разработанных зарубежными агентствами и ведущими геофизических службами), каталога вулканов и импактных структур, а также баз данных по тектонике, содержит цифровые модели рельефа и гравиметрии (по данным ДЗЗ),

данные теплового потока Земли (собранные в Университете Северной Дакоты) и 3D-модель томографии (Дублинский Институт перспективных исследований).

Для рассмотрения глобальных геофизических структур и связанных с ними глубинных геодинамических процессов, потребовалось расширение аналитического блока системы GIS-ENDDB. Методы работы с цифровыми моделями (ЦМ): визуализации полей в виде изолиний и зональных карт, трансформации полей, распознавания линейных и дугообразных структур по группированию сейсмичности [2], пополнились новыми методами по выявлению гигантских кольцевых структур (в цифровых моделях рельефа и геофизических полей) и поиска сейсмолинеамента по Большому кругу Земли.

### *Алгоритмы*

Для выявления крупных кольцевых структур (КС) используется теневые модели рельефа. Наиболее сложно диагностировать морфоструктурные признаки гигантских ударных структур диаметром в сотни и тысячи километров, у которых отсутствует хорошо выраженная отрицательная форма рельефа из-за малой относительной глубины, а также ввиду их подверженности различным факторам разрушающего воздействия окружающей среды и процессам выравнивания. Лишь выраженные в рельефе фрагменты вала и центрального поднятия [3] могут стать основой методики их выявления. Для выполнения операции поиска нужной окружности в GIS-ENDDB предусмотрена процедура построения и уточнения окружности по множеству опорных точек. Опорные точки можно отмечать по максимумам рельефа в геофизических полях и других слоях (например, в множестве землетрясений). Согласно положениям ударно-взрывной тектоники, гигантские ударные структуры (с  $D \geq 200$  км) сами оказываются причиной последующих тектонических движений [4]. Поэтому их выявление – одна из новых задач геотектоники. Геофизические данные, введенные в систему GIS-ENDDB, позволяют получать дополнительную информацию о свойствах среды в области выявленных формализованными методами кольцевых структур и выработки дополнительных критериев диагностики ударных кратеров, в частности, по кольцевым или многокольцевым аномалиям гравитационного поля  $\Delta g$  и наличию положительного центрального пика в центре этих аномалий (зачастую отсутствующего в поверхностном рельефе), а также элементам билатеральной симметрии в аномалиях гравиметрии, теплового потока и сейсмотомографии.

Также ЦМ геофизических полей помогают исследовать свойства линейных структур сейсмичности, выявляемых формализованными методами. Предполагается, что эти структуры связаны с глобальными глубинными разломами (ГГР), которые являются основными структурообразующими элементами земной коры и верхов мантии, обеспечивая их флюидными компонентами и расплавами и контролируя геологические процессы в местах их локализации. Линеamentные структуры на дневной поверхности рельефа корреляционно связаны с ГГР, но зачастую не определяют его истинное положение. ГГР является живой системой с активными процессами твердотельного «молниеносного» метаморфизма [5]

(с. 254-260), не предполагающего обязательного разрыва сплошности среды. Ярким примером наличия ГГР без нарушения механической связности отдельностей могут служить внутриконтинентальные глобальные разломы, определяющие сейсмоопасные зоны шириной 2-4 км. [6]. Согласно эмпирически установленной концепции иерархической делимости твердых тел [7] ранговое отношение размеров отдельностей должно быть близко к 3, т.е. число больших трещин счетно на каждом континенте в зависимости от принятого критерия глобальности. Хотя процессы глобальной делимости осложнены множеством случайных факторов, они не могут нарушать фундаментальные законы детерминированного действия.

Руководствуясь этими фундаментальными законами можно попытаться локализовать истинное положение каждого ГГР. Этой цели служит алгоритм построения сейсмолинеамента по Большому кругу Земли (условно названный БК), имеющий три задаваемых параметра [8]: число точек в цепочке  $n_{\text{MIN}}$ , максимальное расстояние между референтными событиями  $L$  и делитель  $d$  вычислимого параметра  $\Delta h_{\text{MAX}} = L/d$ . (где  $\Delta h_{\text{MAX}}$  – ширина сейсмолинеамента). Первый параметр обеспечивает статистическую представительность построения, а второй, геометрический, со стороны минимума и максимума ограничен расстояниями взаимного динамического влияния очаговых зон [9] и диполеобразной геометрией поля главных напряжений в окрестности сейсморазрыва [10], а для  $M_S < 7.5$  - условием влияния на базальтовый слой зон очагов с учетом кривизны сейсмоактивного слоя. Оценить эти значения можно, исходя из размера очага  $L_0$ , представлений о физике передачи взаимодействия между очагами и простых геометрических расчетов. Экспоненциально убывающим энергетическим влиянием очага можно пренебречь на расстоянии  $1.5L_0$  от его центра, т.е. для  $L$  рекомендуется оценка  $3 \cdot L_0$  [11].

Оценки  $L_0$  характеризуются большим разбросом, например, согласно [12]:

$$\lg L_0 = (0.433 \pm 0.065) M_S - 1.468 \pm 0.510 \text{ (большая ось очага),}$$

$$\lg D_0 = (0.453 \pm 0.061) M_S - 1.9 \pm 0.480 \text{ (малая ось очага),}$$

$$\Rightarrow \text{ для } M_S=7 \Rightarrow D_0 \sim 2.3 \div 158.5 \text{ км; } L_0 \sim 4.7 \div 337.3 \text{ км} \Rightarrow L=3 \cdot L_0 \sim 14.1 \div 1012 \text{ км (1)}$$

Влияние кривизны и толщины сейсмоактивного слоя на механику разрушения среды учитывается для относительно небольших  $L$ . Воздействие, инициирующее или поддерживающее глобальный разлом в базальтовом слое, могут оказывать землетрясения с  $M_S < 7.5$ , если зоны их очагов разнесены на  $L_F \geq 2\sqrt{2RH + H^2/3}$ , где  $H$  - глубина границы Конрада (рис. 1).

Например, для  $H \sim 15 \div 20$  км  $\Rightarrow L_{\text{FK}} \geq 874.5 \div 1010$  км  $\Rightarrow$  для  $M_S=6.75$  ( $L_0 \sim 253$ ,  $L \sim 760$  км)  $L_{\text{MIN}} = L_{\text{FK}} - 2L_0 \sim 368 \div 504$  км. Т.е.  $L_{\text{MIN}} \sim L/2$  (при  $M_S > 6.7$ ). Сверху  $L$  ограничена значением  $H$  для границы Мохо:  $H \sim 30 \div 70$  км  $\Rightarrow L = L_{\text{FM}} + 2L_0 \sim 1912 \div 2424$  км (для  $M_S=7$ ), превышая оценку (1). Эти же соображения накладывают ограничения на диапазон магнитуд  $M_S(L)$  сильнейших событий и их глубину. Действительно, слабые события не тяготеют к оси разлома [13] и не могут его трассировать, а поверхностные события связаны с поверхностными разломами, не разрывающими базальтовый фундамент.

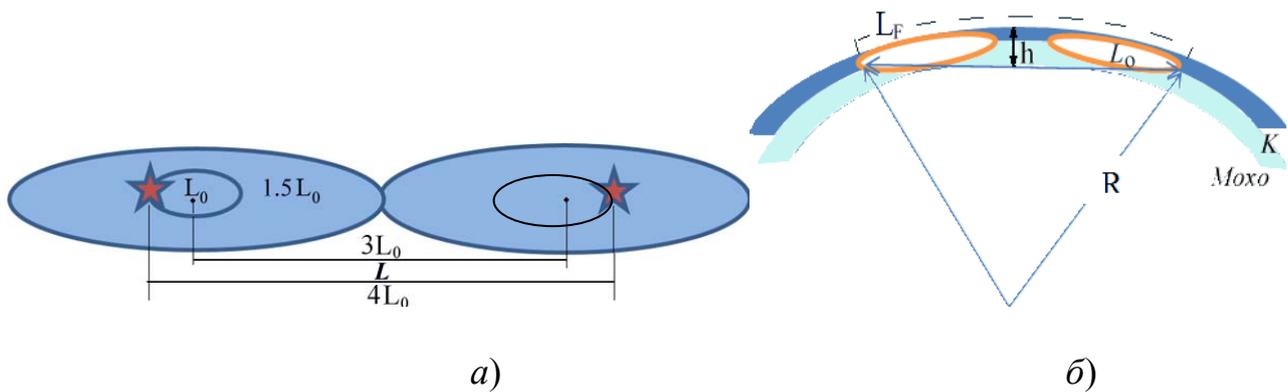


Рис. 1. Схемы взаимодействия полей напряжения очаговых зон (длиной  $L_0$ ), накладывающего ограничение на максимальное значение  $L$  (а) и  $L_{\text{MIN}}$  (б)

В последней версии алгоритм БК оптимизирован по сравнению со своим первоначальным вариантом [8]. Вместо предлагаемого ранее расчета расстояний между всеми крупными событиями выборки, предложен вариант поиска ближайшего по времени события к текущему с последующим расчетом расстояния между ними. Это значительно ускорило работу алгоритма (уменьшило на 1-2 порядка количество проходов каталога). Кроме того, для расчета представительного объема выборки пар крупных событий  $N_{\text{MAX}}$  принят показательный (экспоненциальный) закон распределения [14, 15], применимый для редких событий (каковыми и являются крупные землетрясения).

В результате изложенных выше соображений, алгоритм БК представляет собой следующую последовательность шагов (рис. 2):

1. Расчет  $M_{\text{MAX}}$  - максимальной магнитуды событий выбранной территории с заданными глубинами и  $N$  - количества событий с  $M_{\text{MAX}} - dM \leq M_S \leq M_{\text{MAX}}$  ( $dM = 0.3 \div 2$  при  $M_{\text{MAX}} = 6.7 \div 9$ ) и со случайным распределением по площади и экспоненциальным распределением по времени с вероятностью  $P = 1 - 1/e$  того, что следующее событие наступит раньше значения математического ожидания;

2. Отбор среди  $N$  событий всех хронологически последовательных пар, которые находятся на расстоянии  $L/2 \leq \text{dst}(i_0, i) \leq L$  друг от друга, сохранение их в массив сейсмолинементов  $m\_Selcl[j]$ ;

3. Итерационное повторение п. 2 для всех событий, следующих друг за другом через одно промежуточное событие, затем через два, через три и т.д., пока не наберется  $N_{\text{MAX}} = (1 - 1/e) \cdot N$  пар;

4. Построение плоскости через каждую пару событий и центр Земли, пересекающую литосферу по Большому кругу (БК) Земли (предполагая, что в  $N_{\text{MAX}}$  попали все пары событий, между которыми существует поле напряжений, способное породить протяженный разлом по дуге БК);

5. Вычисление расстояния между событиями каталога и каждой из построенных плоскостей, отбирая плоскости БК с достаточным количеством ( $n \geq n_{\text{MIN}}$ ) близко расположенных событий (с фиксированным удалением от плоскости  $\Delta h \leq L/d$ ). Занесение номеров этих событий в строку массива  $m\_Selcl[j]$ , начинающуюся номерами соответствующей базовой пары событий.

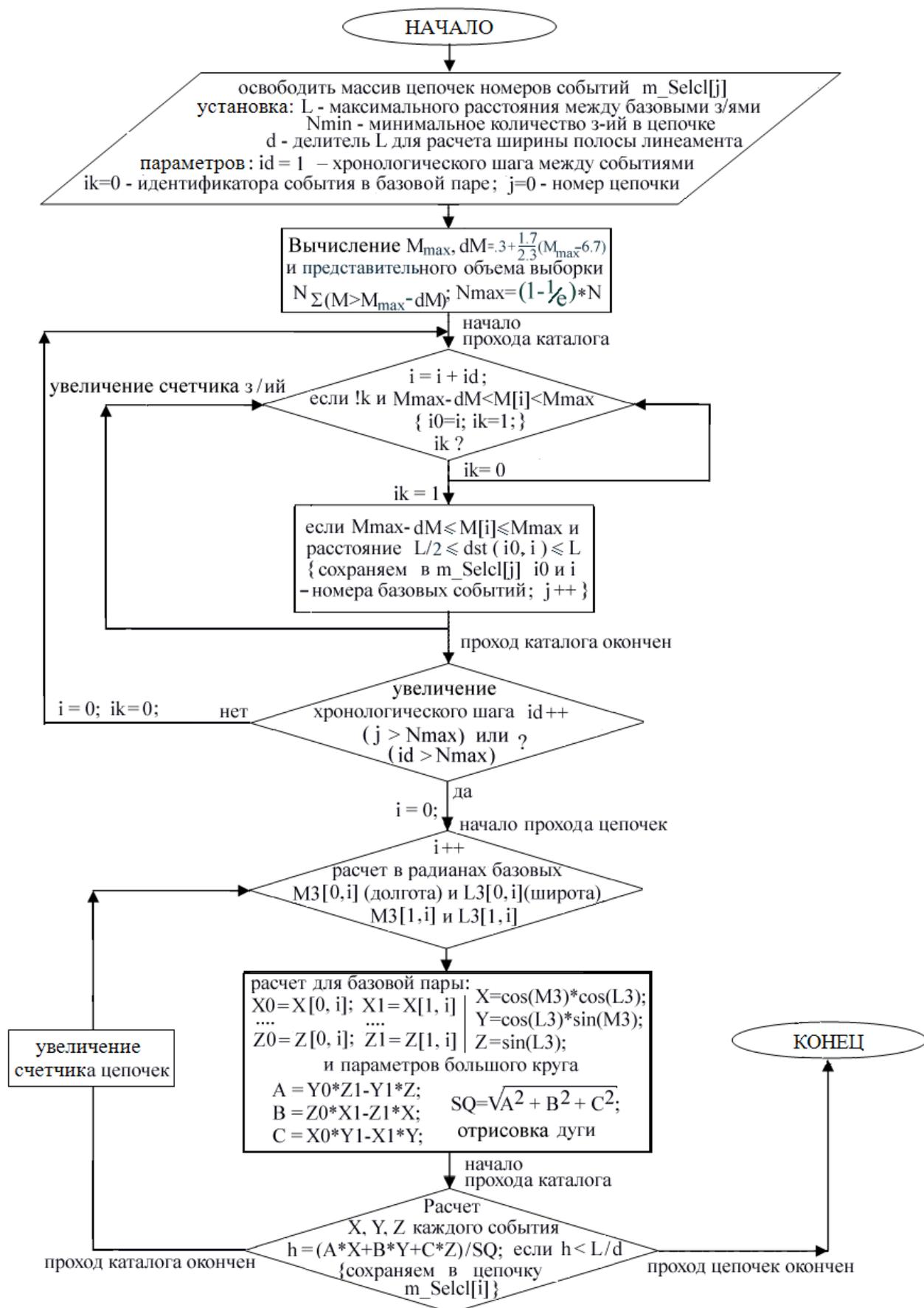


Рис. 2. Алгоритм формирования массива  $m\_Selcl[i]$  сейсмолинементов по Большому кругу Земли

На рис. 2 приведена логическая схема алгоритма формирования массива  $m\_Selcl[j]$ , используемого затем для визуализации в режимах «листание» (по одному сейсмолинеаменту) или «все». В режиме «все» создается файл  $geo\_structure\_BK$  с перечнем сейсмолинеаментов, а в режиме «листание» – файл  $lineament$  BK с текущим сейсмолинеаментом, куда заносятся формула Большого Круга (БК), базовые и остальные события  $\Delta h$ -полосы.

Кроме того, при листании формула БК, информация о базовых событиях текущего сейсмолинеамента и количестве остальных его событий выводится в статусной строке экрана, а параметры этих землетрясений - в иконке легенды.

Формула Большого круга в сферической тригонометрии:

$$R(j, i) = \arccos(\sin(F(j)) \cdot \sin(F(i)) + \cos(F(j)) \cdot \cos(F(i)) \cdot \cos(W(j) - W(i))),$$

где  $F(i)$ ,  $W(i)$  - широта и долгота  $i$ -ой точки, соответственно.

В декартовой системе координат прямоугольной карты:

$$F(i) = -\arctan((a \cdot \cos(W(i)) + b \cdot \sin(W(i))) / c),$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты плоскости  $aX + bY + cZ = 0$ , проходящей через 2 базовых события и центр Земли. При этом, расстояние  $\Delta h$  от точки  $(X, Y, Z)$  до плоскости:

$$\Delta h = (aX + bY + cZ) / \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}.$$

В основу расчета  $N_{MAX}$  принято наблюдаемое соответствие различных выборок землетрясений с  $M_{MAX} - dM \leq M_S \leq M_{MAX}$  экспоненциальному закону распределения (рис. 3, б) с параметром  $\lambda$  (называемым отношением риска) и матожиданием, равным среднему времени между  $N$  событиями  $1/\lambda = T/N$ :

$$p(\Delta T, \lambda) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \Delta T).$$

Поскольку вероятность того, что следующее событие произойдет через  $\Delta T < 1/\lambda$ , равно  $1 - e^{-1}$  можно предположить, что выборка  $N_{MAX} = (1 - 1/e) \cdot N$  (63% событий) охватит все пары событий, связанных неслучайным образом, т.е. механизмом триггирования. Установлено, что связанные пары на реальных графиках (отмеченные стрелками на рис. 3) сосредоточены на ещё меньших  $\Delta T$ :  $\Delta T < 1/2\lambda$  и даже  $\Delta T < 1/7\lambda$  (рис. 3б), что соответствует  $N_{MAX} = (1 - 1/\sqrt{e}) \cdot N$  (39% событий) и  $N_{MAX} = (1 - 1/\sqrt[7]{e}) \cdot N$  (13% событий).

### ***Результаты***

Варьируя значениями управляющего параметра  $L$  и соотношением  $h = L/n_{MIN}$  пользователь может строить различные варианты БК (рис. 3, а): охватывающие сильнейшие землетрясения последних лет или соответствующие известным глубинным разломам, включая межплитные литосферные границы (при расчете которых также применяется принцип Большого круга [16]).

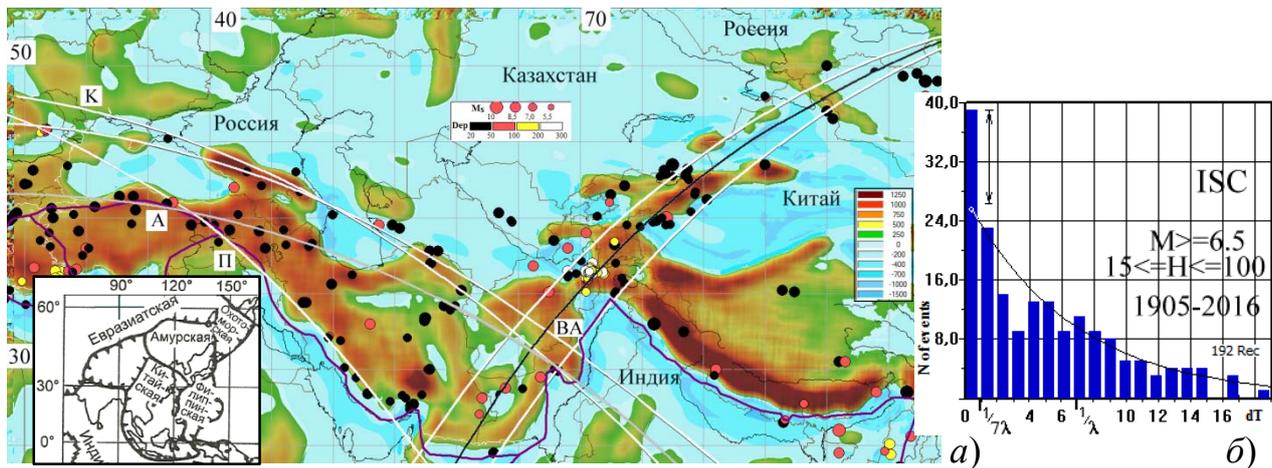


Рис. 3. Распределение крупных событий:

*a)* на карте  $\Delta g_R$  ( $R=85$  км) Евразии (SIGN; -250–2008г,  $M_S \geq 6$ ,  $20 \leq H \leq 300$  км), нанесены межплитные границы и сохраненные в архиве глобальные сейсмолинеаменты БК: “Крымский” (К) с различным  $h$  (ISC:  $4 \leq M_S \leq 7$ ;  $6 \leq H \leq 800$  км,  $h=11.8$ ;  $(L, n_{\text{MIN}}) = (600$  км, 51) и  $5 \leq M_S \leq 7$ ,  $h = 35.7$ ;  $(L, n_{\text{MIN}}) = (500$  км, 14)), “Персидский” (П) (ISC, 1905–2016г;  $(L, n_{\text{MIN}}) = (1200$  км, 5);  $M_S \geq 6.5$ ;  $15 \leq H \leq 300$  км), “Анатолийский” (А) (ISC, 1905–2016г;  $(L, n_{\text{MIN}}) = (200$  км, 28);  $M_S \geq 6$ ;  $15 \leq H \leq 100$  км) и “Внутриазиатский” (ВА) с различным  $h$  (SIGN, -250–2008г; осевая дуга:  $h = 71.4$ ;  $(L, n_{\text{MIN}}) = (1000$  км, 14);  $M_S \geq 6.5$ ;  $H \leq 100$  км); во врезке: межплитные разломы по [16]; *б)* зависимость от  $\Delta T$  числа пар глубоких событий восточной половины карты (а)

Для уточнения критерия выбора достоверного сейсмолинеамента помогают включенные в GIS-ENDDB геофизические данные, в частности, высокие градиенты геофизических полей: гравитационного, магнитного, теплового [9], в том числе трансформированных, позволяющих сгладить локальные неоднородности, вызванные различными поверхностными факторами и выделить в суммарном поле региональную компоненту (например,  $\Delta g_R$ ). В частности, выявленные алгоритмом БК “Крымский” и “Внутриазиатский” сейсмолинеаменты соответствуют цепочкам максимумов региональной составляющей гравитационного поля  $\Delta g_R$  (рис. 3, *a*).

По гравиметрической ЦМ или модели теплового потока в GIS-ENDDB можно строить профили, а по ЦМ сейсмо-томографии – вертикальные сечения произвольного направления. В частности, “Внутриазиатский” сейсмолинеамент характеризуется приуроченностью к аномалии пониженных значений поля скоростей  $S_V$ -волн, проявившейся на глубинах 35-80 км.

Алгоритм опробован на фактическом материале многих территорий: Центральной Азии, Тихоокеанской зоны субдукции [8], Крымско-Кавказской области и других сейсмически активных регионов (рис. 3, *a*) и показал хорошее соответствие выявляемых им структур известным межплитным границам. Так, “Внутриазиатский” сейсмолинеамент отмечает межплитную границу между Евразийской плитой и Китайским агломератом, признаваемую многими авторами [17, 18, 19] (врезка рис. 3, *a*). “Персидский” сейсмолинеамент повторяет

известную межплитную границу на протяжении 3000 км, “Анатолийский” – границу и разлом на протяжении 2500 км (рис 3а).

### *Заключение*

Алгоритм БК помогает обнаруживать направление развития глубинного сейсмогенного процесса и, возможно, выявляет тектонические структуры глубокого заложения (ГГР), созданные в результате крупных воздействий и/или многовековых геологических процессов и активизируемые парами крупных землетрясений. Например, выявленный алгоритмом БК “Внутриазиатский” сейсмолинеament согласуется с вектором развития глубинного сейсмогенного процесса в Центрально-Азиатском регионе [19, 20]: на северо-восток от Памиро-Гиндукушской к Байкальской рифтовой зоне. Кроме того, известно, что зоны ГГР характеризуются улучшенной проницаемостью для магм, гидротерм и тепловых потоков, способствующих возникновению эндогенных месторождений. Поэтому уверенно локализованный ГГР позволяет организовать прогнозные и исследовательские работы практически во всех областях человеческой деятельности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mikheeva A.V., Marchuk An.G. Geographical information system “The Earth's natural disasters Database” (ENDDDB) as a tool for studying complex geotectonic structures // Bulletin of Novosibirsk Computer Center. Series: Computer Science. – 2016. – No. 39. – P. 25-36.
2. Михеева А.В. Геоструктурные элементы, выявляемые математическими алгоритмами и цифровыми моделями геоинформационно-вычислительной системы GIS-ENDDDB. – Новосибирск: Омега Принт, 2016. – 300 с.
3. Mikheeva A.V., Nazivaliev F.R., Chetverova O.P. Geomorphologic features of the Earth's large cosmogenic structures // Bulletins of the Novosibirsk Computing Center, Series: Math. Model. in Geophys. – 2016. – Vol. 19. – P. 59-66.
4. Зейлик Б.С. Ударно-взрывная тектоника и краткий очерк тектоники плит. – Алма-Ата: Гылым, 1991. – 120 с.
5. Калинин В.А. Связь физических свойств вещества в процессе превращений с тектоникой и землетрясениями // Избранные труды. Свойства геоматериалов и физика земли. – М.: ОИФЗ РАН, 2000. – 334 с.
6. Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердом теле. – М.: Наука, 1989. – 158 с.
7. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. – 1979. – Т. 247. – № 4. – С. 829-831.
8. Kalinnikov I.I., Mikheeva A.V. Algorithms of building lineaments in the program GIS-ENDDDB // Bulletin of Novosibirsk Computer Center. Series: Mathematical Models in Geophysics. – 2016. – No. 13. – P. 1-9.
9. Шерман С.И. Тектонофизические параметры разломов литосферы, избранные методы изучения и примеры использования // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы первой молодежной школы-семинара. – М.: ИФЗ, 2009. – С. 302-317.
10. Поля напряжений и деформаций в земной коре. – М.: Наука 1987. 184 с.
11. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники / отв. ред. В.Н. Страхов. – М.: Наука, 2003. – 270 с.

12. Лутиков А.И., Донцова Г.Ю. Оценка линейных размеров очагов землетрясений камчатки по размерам облака афтершоков // Физика Земли. – 2002. – № 6. – С. 46-56.
13. Мирзоев К.М. Сейсмический режим и районирование зоны сопряжения Памира, Гиндукуша и южного Тянь-Шаня (Таджикистан) : дисс. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.12 / Мирзоев Камиль Мамедович. – М., 1988. – 443 с.
14. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере / ред. В.Э. Фигурнов. – М.: Инфра-М, 2003. – 544 с.
15. Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф // Вычислительная сейсмология. – 2007. – Вып. 38. – 242 с.
16. Bird P. An updated digital model of plate boundaries // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2003. – Vol. 4. – No. 3. – P. 1027. – DOI: 10.1029/2001GC000252.
17. Добрецов Н.Л., Кидряшкин А.Г., Кидряшкин А.А. Глубинная геодинамика: 2-изд., доп. и перераб. – Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2001. – 409 с.
18. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. – М.: Недра, 1988. – 491 с.
19. Степашко А.А. О роли мантийной структуры в генезисе юго-западного фланга Байкальской сейсмической зоны // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе. – Иркутск, 2012. – Т. 1. – С. 66-69.
20. Рузайкин А.И. Зависимость свойств волн Lg от глубины источника // Физика Земли. – 1994. – № 7-8. – С. 27-34. – (Известия Академии наук СССР, Физика Земли).

© А. В. Михеева, И. И. Калинин, 2018

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ЮЖНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ**

### ***Валерий Викторович Ковалевский***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, тел. (383)330-71-96, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

### ***Алексей Геннадьевич Фатьянов***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, тел. (383)330-60-46, e-mail: fat@nmsf.sccc.ru

### ***Дмитрий Алексеевич Караваяев***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, тел. (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sccc.ru

### ***Андрей Валерьевич Терехов***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, тел. (383)330-60-46, e-mail: terekhov@ssd.sccc.ru

### ***Людмила Петровна Брагинская***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий программист, тел. (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sccc.ru

### ***Андрей Павлович Григорюк***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: and@opg.sccc.ru

В статье приведены результаты математического моделирования полных волновых полей и теоретические сейсмограммы для двух скоростных моделей земной коры, полученных для юга Байкальской рифтовой зоны в экспериментах BEST (Baikal Explosion Seismic Transect), PASSCAL (Program for the Array Seismic Study of Continental Lithosphere) и MOBAL (Mongolian-Baikal Lithosphere seismological transect). Приведены экспериментальные данные вибросейсмических исследований на 500-км профиле Байкал-Улан-Батор. Выполнен анализ и сравнение теоретических сейсмограмм и экспериментальных данных времен первых вступлений в группе Р-волн.

**Ключевые слова:** скоростные модели земной коры, эксперименты BEST, PASSCAL и MOBAL, математическое моделирование полных волновых полей, вибросейсмические исследования.

## **MATHEMATICAL MODELING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF VIBRO SEISMIC WAVE FIELDS IN BAIKAL REGION**

### ***Valeriy V. Kovalevskiy***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Professor, phone: (383)330-70-69, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

### ***Aleksey G. Fatyanov***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Professor, phone: (383)330-60-46, e-mail: fat@nmsf.sccc.ru

### ***Dmitriy A. Karavaev***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., phone: (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sccc.ru

### ***Andrey V. Terekhov***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., phone: (383)330-60-46, e-mail: terekhov@ssd.sccc.ru

### ***Ludmila P. Braginskaya***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Lead Programmer, phone: (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sccc.ru

### ***Andrey P. Grigoruk***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: and@opg.sccc.ru

The paper presents the results of mathematical modeling of the full wave fields and theoretical seismograms for two velocity models of the Earth's crust obtained for the south of the Baikal rift zone in the experiments BEST (Baikal Explosion Seismic Transect), PASSCAL (Program for the Array Seismic Study of Continental Lithosphere) and MOBAL (Mongolian-Baikal Lithosphere seismological transect). Experimental data of vibroseismic studies on the Baikal-Ulaanbaatar 500-km profile are presented. Analysis and comparison of theoretical seismograms and experimental data of the first arrivals times in the group of P-waves is performed.

**Key words:** Earth's crust velocity models, BEST, PASSCAL, MOBAL experiments, mathematical modeling of full wave fields, vibroseismic research.

### ***Введение***

Исследования строения земной коры Байкальской рифтовой зоны является одной из фундаментальных задач геофизики, непосредственно связанной с изучением процессов рифтогенеза и современной геотектоники в одном из наиболее сейсмоактивных регионов Азии [1-8]. В настоящее время построено не-

сколько скоростных моделей земной коры юго-западной части Байкальской рифтовой зоны на основе данных глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и анализа вступлений Р-волн землетрясений методом приемной функции [9-11]. В регионе проводятся вибросейсмические исследования по методике активной сейсмологии и выполнен большой объем работ по регистрации вибросейсмических полей мощного сейсмического вибратора ЦВО-100 Южно-Байкальского геодинамического полигона СО РАН [12, 13].

### Постановка задачи

Современные скоростные модели земной коры юга Байкальской рифтовой зоны и сопредельных областей северной Монголии получены в экспериментах BEST (Baikal Explosion Seismic Transect), а также PASSCAL (Program for the Array Seismic Study of Continental Lithosphere) и MOBAL (Mongolian-Baikal Lithosphere seismological transect) (рис. 1). Они имеют существенные различия и получены различными методами. В эксперименте BEST использовался метод ГСЗ с отраженными и преломленными волнами [9], в экспериментах PASSCAL и MOBAL - метод приемной функции с выделением в коде Р-волны обменных поперечных волн [10].

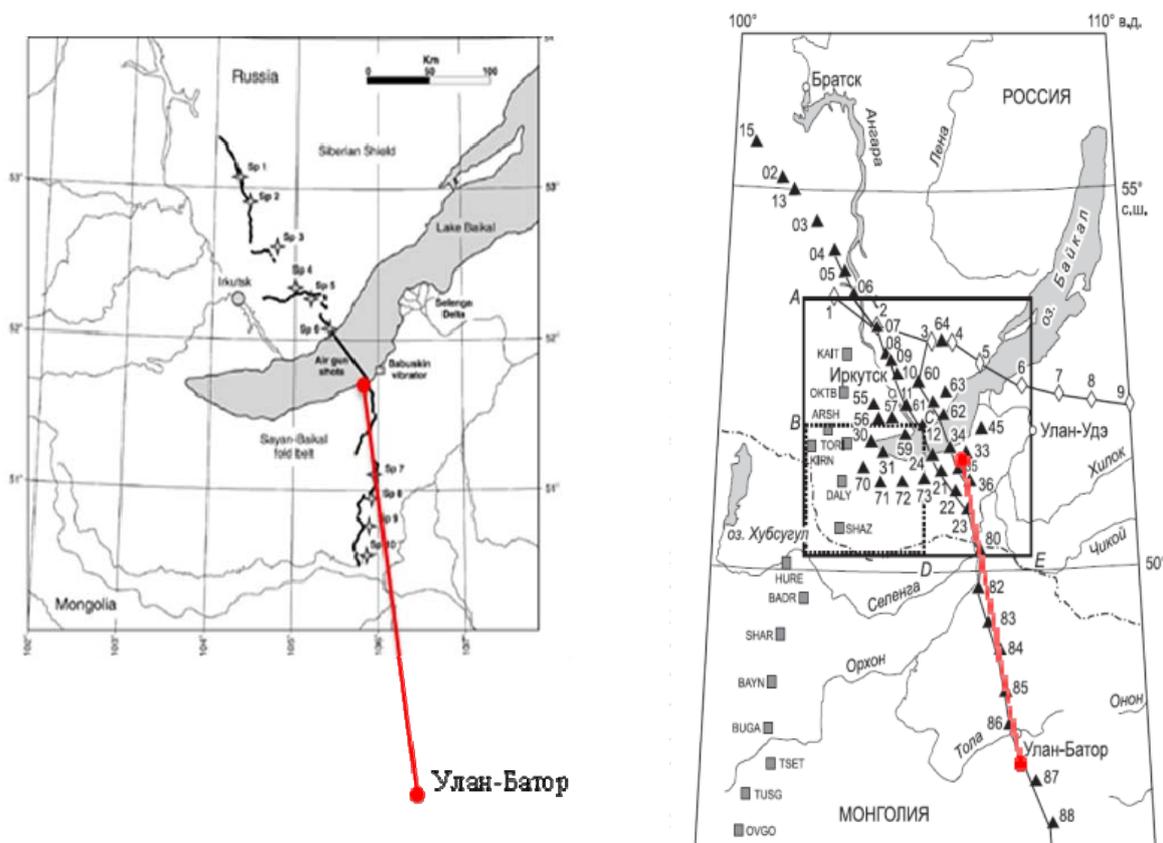


Рис. 1. Карта профилей экспериментов.

Эксперимент BEST – слева, эксперименты PASSCAL и MOBAL – справа, [9, 10].  
Сплошная линия – 500 км профиль вибро-ГСЗ, Байкал – Улан-Батор

Целью международного эксперимента BEST являлось определение скоростного строения земной коры и верхней мантии под Сибирской платформой, Байкалом и Саяно-Байкальским складчатым поясом. Сейсмические данные были получены по методике ГСЗ с отраженными и преломленными волнами на 360-км профиле пересекающем Байкал и тектонические структуры южного Байкала (рис. 1). Использовались 175 цифровых регистраторов установленных вдоль профиля с шагом 2 км. В качестве сейсмических источников использовались взрывы в скважинах на суше, воздушные пушки на акватории Байкала и частично свип-сигналы сейсмического вибратора ЦВ-100 Южнобайкальского полигона.

Результатом работ было построение 2D скоростной модели сейсмических волн в земной коре вдоль профиля протяженностью 360 км пересекающего Байкал. Скоростная модель включает 5 слоев с неплоскими границами (рис. 2). В нижней коре на границе с мантией под Байкалом выделяется зона повышенных скоростей от 7.4-7.6 км/с до 7.9 км/с на глубинах от 30 км до 40 км. Второй особенностью модели является наличие в нижней коре на границе с мантией высокоскоростного слоя со скоростью 7.2-7.3 км/с. Он располагается на глубинах от 28 км до 42 км под Сибирской платформой и от 32 км до 46 км под Саяно-Байкальским складчатым поясом в южном Прибайкалье, при этом мощность слоя составляет более 10 км.

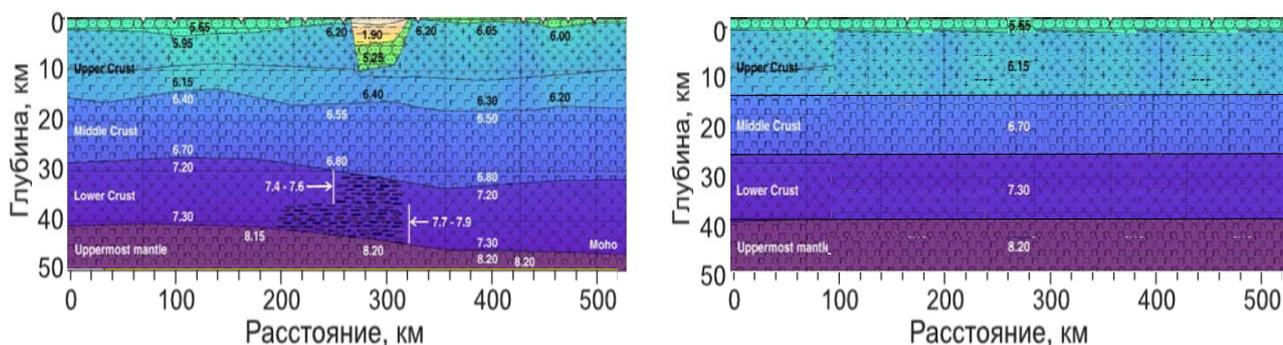


Рис. 2. Скоростные модели земной коры Байкальского региона. Слева скоростная модель по результатам эксперимента BEST [9]. Справа математическая модель для расчета полного волнового поля

### *Математическое моделирование*

При математическом моделировании полных волновых полей для скоростной модели земной коры эксперимента BEST применялся модифицированный численно-аналитический метод для плоскостных 3D моделей сред. Метод позволяет проводить расчеты на сверхдальние расстояния на профилях большой протяженности. В методе используются аналитические преобразования по пространственной и временной переменной и численно вычисляются значения рядов аналитических функций [14, 15].

Для эксперимента BEST математическое моделирование волнового поля осуществлено для модели с пятью плоскими слоями в земной коре на упругом полупространстве, моделирующем верхнюю мантию (рис. 2). Рассматривались варианты модели с разными значениями скоростей продольных волн в слое мощностью 10 км в нижней коре на границе с мантией. В первом случае скорость продольных волн была выбрана  $V_p=7,25$  км/сек, как в модели [9], во втором случае скорость продольных волн в этом слое принята  $V_p=6,65$  км/сек, что характерно для континентальной коры Азиатской плиты. Получены теоретические (синтетические) сейсмограммы, выполнен сравнительный анализ сейсмограмм для двух моделей и экспериментальных данных.

Для численного расчета полного волнового поля для слоистой модели эксперимента BEST с криволинейными границами между слоями был усовершенствован спектрально-разностный параллельный алгоритм, первоначально рассмотренный в [15]. В этом алгоритме исходная начально-краевая задача заменяется посредством интегрального преобразования Лагерра серией краевых задач для эллиптических уравнений.

Для решения разностных уравнений используются экономичные параллельные процедуры на основе быстрого преобразования Фурье и алгоритма дихотомии, разработанного для решения систем линейных алгебраических уравнений с трехдиагональными и блочно-трехдиагональными матрицами. Сокращение вычислительных затрат было достигнуто за счет реализации Dispersion Relation Preserving (DPR)-разностных схем. Дополнительно был реализован классический псевдо-спектральный алгоритм, где вычисление пространственной производной выполняется для каждой Фурье гармонике по отдельности. Пример расчета полного волнового поля для скоростной модели среды эксперимента BEST с рельефом на свободной границе приведен на рис. 3.

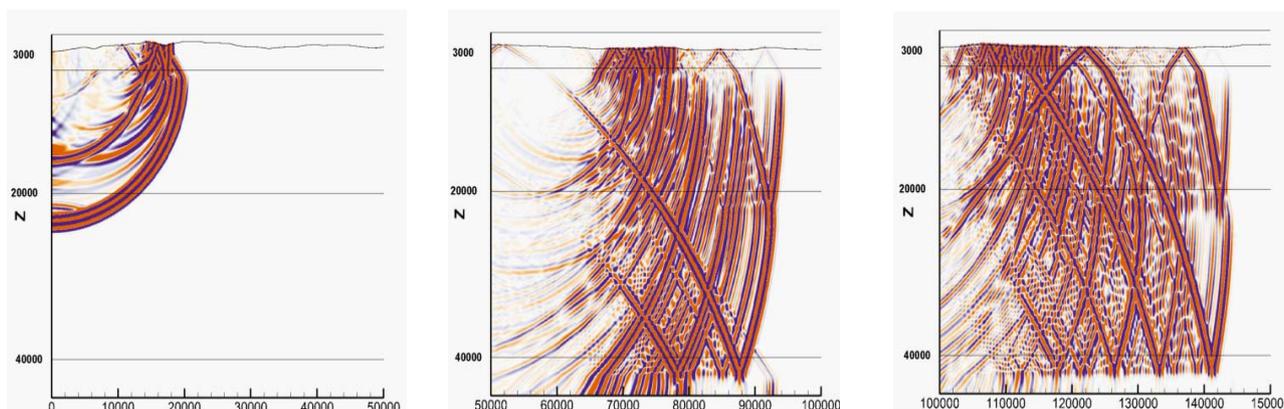


Рис. 3. Полное волновое поле для скоростной модели эксперимента BEST с рельефом на свободной границе в последовательные моменты времени. По горизонтальной оси расстояние от источника в метрах

Международные эксперименты PASSCAL и MOBAL проводились на юге Сибирской платформы, в южной части Байкальской рифтовой зоны и на террито-

рии Монголии [10]. Использовались 46 цифровых станций, установленных на расстоянии от 20-50 км друг от друга, с максимальной длиной профиля 1000 км. Было зарегистрировано и обработано более 100 сейсмограмм телесеismicких событий (землетрясений) с магнитудой более 5.5, с эпицентрными расстояниями 30–80° (3500-9000 км). Анализ сейсмограмм производился методом приемной функции с выделением в коде Р-волны обменных поперечных волн [16]. По результатам экспериментов построена 2D-модель скоростей seismicких волн в земной коре вдоль профилей регистрации. Скоростная модель имеет слабо выраженную слоистую структуру. Границы слоев характеризуются сильной изменчивостью, имеются также пятнистые включения зон повышенных и пониженных скоростей seismicких волн (рис. 4).

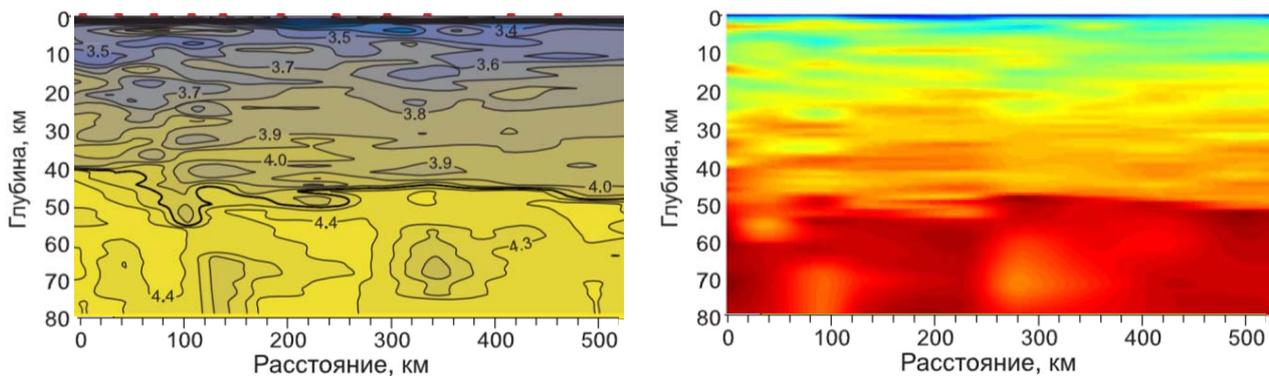


Рис. 4. Скоростная модель по результатам экспериментов PASSCAL и MOBAL [10] – слева. Математическая модель для расчета полного волнового поля – справа

Для математического моделирования полного вибросейсмического поля для существенно неоднородной 2D-модели скоростей seismicких волн в земной коре (эксперименты PASSCAL и MOBAL), а также слоистой модели с учетом криволинейности границ слоев (эксперимент BEST) использовались параллельные алгоритмы на основе конечно-разностных методов [17]. Разработана модифицированная конечно-разностная схема четвертого порядка точности по пространству [18]. Проведена адаптация и программная реализация способа для исключения отражений упругих волн от границ расчетной области. Для этого используется метод поглощающих границ для выбранной разностной схемы [19]. Разработана программа, реализующая расчет распространения упругих волн для основной схемы и для поглощающих границ, на графических картах типа Nvidia GPU поддерживающих технологию CUDA. В программе реализована возможность использования различных точечных источников seismicких волн: центр давления, вертикальная сила.

В результате математического моделирования волновых полей для скоростных моделей земной коры по данным экспериментов BEST, PASSCAL и MOBAL получены синтетические сейсмограммы для расстояний 0-500 км от источника (рис. 5).

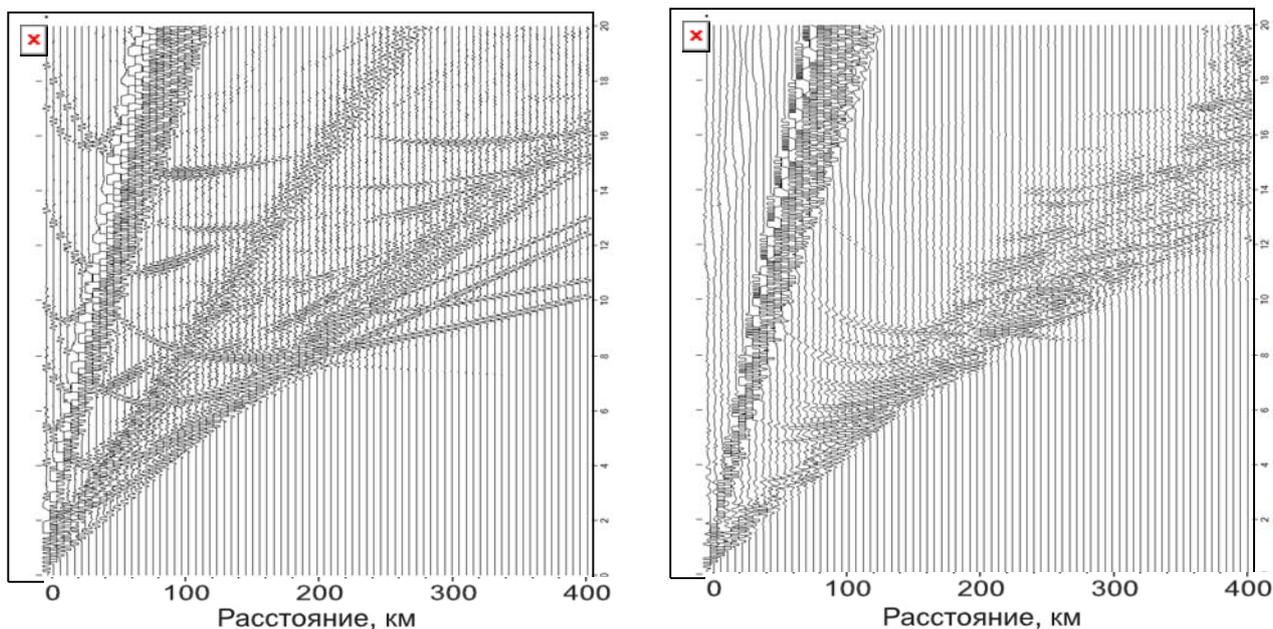


Рис. 5. Редуцированные синтетические сейсмограммы:

Слева для скоростной модели эксперимента BEST, справа для экспериментов PASSCAL и MOBAL – справа. Точки – времена вступлений первых 4 волн на экспериментальных сейсмограммах. По вертикальной оси время в сек. Скорость редукции 8 км/с

На сейсмограммах для слоистой скоростной модели эксперимента BEST отчетливо выделяются прямые, отраженные, преломленные волны с отчетливыми временами вступлений и скоростями, соответствующими слоям модели. Сейсмограммы для неоднородной скоростной модели экспериментов PASSCAL и MOBAL имеют вид протяженных цугов колебаний, представляющих суперпозицию волн. Отраженные волны прослеживаются только на первых 150 км. Волны в первых вступлениях имеют существенно разную амплитуду на различных участках профиля.

### *Экспериментальные исследования*

Экспериментальные работы по активной сейсмологии проводятся в южном Прибайкалье с использованием в качестве источника сейсмических волн мощного 100-тонного сейсмического вибратора, расположенного на Южнобайкальском геодинамическом полигоне СО РАН [20]. Целью работ является глубинное вибросейсмическое зондирование (вибро-ГСЗ) Монголо-Сибирского региона в зоне сочленения Байкальского рифта и Центрально-Азиатского подвижного пояса. В 2011–2013 гг. вибро-ГСЗ выполнено на 500-км профиле Бабушкин–Сухэ-Батор–Дархан–Улан-Батор от 65 км до 500 км в южном направлении от источника на российской и монгольской территории (рис. 1).

Для регистрации использовались малые сейсмические группы из 5-10 трехкомпонентных датчиков с цифровыми регистраторами «Байкал» с общей базой

группы 1-2 км. Расстояния между точками регистрации на профиле составляло от 20 км до 50 км. Для всех точек регистрации на профиле получены вибрационные сейсмограммы, примеры которых представлены на рис. 6.

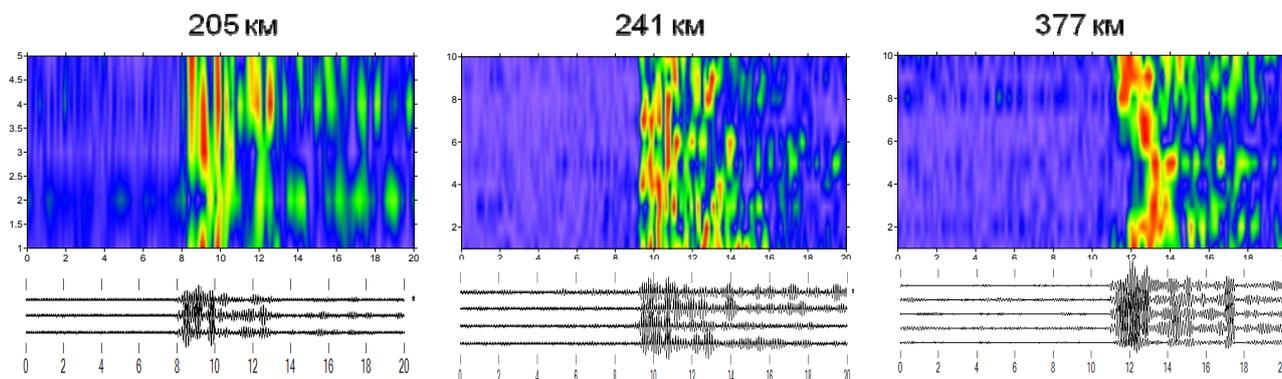


Рис. 6. Экспериментальные вибрационные сейсмограммы.

Графическое представление амплитуд Р-волн – сверху, вибрационные сейсмограммы – внизу. Расстояние от источника 205 км, 241 км, 377 км

Для обработки вибросейсмических сигналов используется специализированное программное обеспечение на базе программы обработки вибросигналов V12, созданной в ИВМиМГ СО РАН. Алгоритмы обработки включают пространственную фильтрацию данных сейсмической группы, которая оказалась очень эффективной для выделения основных групп волн (сейсмических фаз) и подавления волн-помех.

При построении и анализе сейсмограмм применяется преобразование Гильберта и графические средства отображения текущих амплитуд сейсмограмм. Это позволяет построить для сейсмограмм волновые карты участков Р-волн (рис. 6). По вибрационным сейсмограммам и их волновым картам определены времена вступлений в группе Р-волн. Времена вступлений первых 4 волн в качестве экспериментальных данных отмечены на редуцированных синтетических сейсмограммах для скоростных моделей экспериментов BEST, PASSCAL и MOBAL (рис. 5). Они соответствуют временам вступлений группы Р-волн наибольшей интенсивности для этих экспериментов. Вместе с тем, для эксперимента BEST экспериментальные данные не содержат времен вступлений соответствующих волнам со скоростью продольных волн  $V_p=7.25$  км/с связанных со слоем мощностью около 10 км в нижней коре.

### *Заключение*

Математическое моделирование полных волновых полей для двух скоростных моделей земной коры, полученных для юга Байкальской рифтовой зоны в экспериментах BEST, PASSCAL и MOBAL позволило получить теоретические сейсмограммы в области 0-500 км от источника. Анализ эксперименталь-

ных данных времен первых вступлений в группе Р-волн на 500-км профиле Байкал–Улан-Батор показал, что они соответствуют временам вступлений группы Р-волн наибольшей интенсивности для этих экспериментов. Экспериментальные данные не содержат времен вступлений соответствующих волнам со скоростью продольных волн  $V_p=7.25$  км/с связанных со слоем мощностью около 10 км в нижней коре, которая присутствует в скоростной модели земной коры по данным эксперимента BEST.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИВМиМГ СО РАН тема № 0315-2016-0003.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bushenkova N., Tychkov S., Koulakov I. Tomography on PP-P waves and its application for investigation of the upper mantle in central Siberia // *Tectonophysics*, – 2002. – v. 358, № 1–4, p. 57–76.
2. Emmerson B., Jackson J., McKenzie D., Priestley K. Seismicity, structure and rheology of the lithosphere in the Lake Baikal region // *Geophys. J. Inter.*, – 2006. – v. 167, p. 1233–1272
3. Gao S. S., Liu K. H., Davis P. M., Slack P. D., Zorin Y. A., Mordvinova V. V., Kozhevnikov V. M. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone // *J. Geophys. Res.*, – 2003. – v. 108, № B4, 2194, p. ESE 5–12
4. Liu K. H., Gao S. S. Mantle transition zone discontinuities beneath the Baikal rift and adjacent areas // *J. Geophys. Res.*, – 2006. – v. 111, № B11301.
5. Tiberi C., Diament M., De´verche`re J., Petit-Mariani C., Mikhailov V., Tikhotsky S., Achauer U. Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismology // *J. Geophys. Res.*, – 2003. – v. 108, № B3, 2133,
6. Zhao D., Lei J., Inoue T., Yamada A., Gao S. Deep structure and origin of the Baikal rift zone // *Earth Planet. Sci. Lett.*, – 2006. – v. 243, p. 681–691.
7. Zorin Yu. A., Mordvinova V. V., Turutanov E. Kh., Belichenko V. G., Artemyev A. A., Kosarev G. L., Gao S. S. Low seismic velocity layers in the Earth’s crust beneath Eastern Siberia (Russia) and Central Mongolia: receiver function data and their possible geological implication // *Tectonophysics*, – 2002. – v. 359, p. 307–327.
8. Zorin Yu. A., Turutanov E. Kh., Mordvinova V. V., Kozhevnikov V. M., Belichenko V. G., Mazuka bzov A. M., Tumurtogoo O., Khosbayar P., Arvisbaatar N., Gao S. Structure of the crust and paleogeodynamic of Central and Eastern Mongolia and adjacent regions of Eastern Siberia (result of investigations on SiberianMongolian transects) // *Complex geophysical and seismological investigations in Mongolia. Ulaanbaator, Irkutsk*, – 2004. – p. 33–50.
9. Nielsen C., Thybo H. Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data // *Tectonophysics*. – 2009. – v. 470. – C. 298-318.
10. Mordvinova V. V. and Artemyev A. A. The three-dimensional shear velocity structure of lithosphere in the southern Baikal rift system and its surroundings // *Russian Geology and Geophysics*, – 2010. – Vol. 51, Issue 6, June 2010, p. 694-707
11. Suvorov V. D., Mishenkina Z. M., Petrick G. V., Sheludko I. F., Seleznev V. S., Solovyov V. M. Structure of the crust in the Baikal rift zone and adjacent areas from Deep Seismic Sounding data // *Tectonophysics*, – 2002. – v. 351, p. 61–74.
12. Alekseev A. S., Tsibulchik G. M., Kovalevsky V. V., Belonosov A. S. The basis of the theory of active geophysical (multidisciplinary) monitoring. Conception of “source” and “surface” dilatant zones // *Active geophysical monitoring, Handbook of Geophysical Exploration, Vol. 40*, Elsevier, – 2010. – p. 105-133.

13. Alekseev A. S., Glinsky B. M., Kovalevsky V. V., Khairtdinov M. S. Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results // *Active geophysical monitoring, Handbook of Geophysical Exploration*, Vol. 40, Elsevier, – 2010. – p. 55-71
14. Fatyanov A. G., Terekhov A. V. High-performance modeling acoustic and elastic waves using the Parallel Dichotomy Algorithm // *Journal of Computational Physics*, – 2011. – Vol. 230. p. 1992–2003.
15. Terekhov A. V., Spectral-difference parallel algorithm for the seismic forward modeling in the presence of complex topography // *Journal of Applied Geophysics*, – 2015.– Vol. 115, p. 206-219.
16. Vinnik L. P. Detection of waves converted from P to S in the mantle // *Phys. Earth Planet. Inter.*, – 197.7– v. 15, p. 39—45.
17. Караваев Д. А. Параллельная реализация метода численного моделирования волновых полей в трехмерных моделях неоднородных сред // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2009. – № 6 (1). С. 203 – 209
18. Levander A. R. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms // *Geophysics* – 1988. – vol. 53, p. 1425–1436
19. Komatitsch D. and Martin R. An unsplit convolutional Perfectly Matched Layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation // *Geophysics*, – 2007. – vol. 72(5), p. SM155-SM167.
20. Kovalevskiy V. Chimed O., Tubanov Ts., Braginskaya L., Grigoruk A., Fatyanov A. Vibroseismic sounding of the Earth's crust on the profile Baikal – Ulaanbaatar // *Proceedings of the International Conference on Astronomy & Geophysics in Mongolia*, – 2017.– p. 261-265.

## REFERENCES

1. Bushenkova N., Tychkov S., Koulakov I. (2002). Tomography on PP-P waves and its application for investigation of the upper mantle in central Siberia. *Tectonophysics*, v. 358, № 1—4, p. 57—76.
2. Emmerson B., Jackson J., McKenzie D., Priestley K. (2006). Seismicity, structure and rheology of the lithosphere in the Lake Baikal region. *Geophys. J. Inter.*, v. 167, p. 1233—1272
3. Gao S. S., Liu K. H., Davis P. M., Slack P. D., Zorin Y. A., Mordvinova V. V., Kozhevnikov V. M. (2003). Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone. *J. Geophys. Res.*, v. 108, № B4, 2194, P. ESE 5—12
4. Liu K. H., Gao S. S. (2006). Mantle transition zone discontinuities beneath the Baikal rift and adjacent areas. *J. Geophys. Res.*, v. 111, № B11301.
5. Tiberi C., Diament M., De´verche`re J., et al. (2003). Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismology. *J. Geophys. Res.*, v. 108, № B3, 2133,
6. Zhao D., Lei J., Inoue T., Yamada A., Gao S. (2006). Deep structure and origin of the Baikal rift zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 243, p. 681—691.
7. Zorin Yu. A., Mordvinova V. V., Turutanov E. Kh., et al. (2002). Low seismic velocity layers in the Earth's crust beneath Eastern Siberia (Russia) and Central Mongolia: receiver function data and their possible geological implication. *Tectonophysics*, v. 359, p. 307—327.
8. Zorin Yu. A., Turutanov E. Kh., Mordvinova V. V., et al. (2004). Structure of the crust and paleogeodynamic of Central and Eastern Mongolia and adjacent regions of Eastern Siberia (result of investigations on SiberianMongolian transects). *Complex geophysical and seismological investigations in Mongolia. Ulaanbaator, Irkutsk*, p. 33—50.
9. Nielsen C., Thybo H. (2009). Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data. *Tectonophysics*. - 2009. 470. – C. 298-318.
10. Mordvinova V. V. and Artemyev A. A. (2010). The three-dimensional shear velocity structure of lithosphere in the southern Baikal rift system and its surroundings. *Russian Geology and Geophysics*, Vol. 51, Issue 6, June 2010, Pp. 694-707

11. Suvorov V. D., Mishenkina Z. M., Petrick G. V., et al. (2002). Structure of the crust in the Baikal rift zone and adjacent areas from Deep Seismic Sounding data. *Tectonophysics*, v. 351, p. 61—74.
12. Alekseev A. S., Tsibulchik G. M., Kovalevsky V. V., Belonosov A. S. (2010). The basis of the theory of active geophysical (multidisciplinary) monitoring. Conception of "source" and "surface" dilatant zones. *Active geophysical monitoring, Handbook of Geophysical Exploration*, Vol. 40, Elsevier, pp. 105-133.
13. Alekseev A. S., Glinsky B. M., Kovalevsky V. V., Khairtdinov M. S. (2010) Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results. *Active geophysical monitoring, Handbook of Geophysical Exploration*, Vol. 40, Elsevier, pp. 55-71
14. Fatyanov A. G., Terekhov A. V. (2011) High-performance modeling acoustic and elastic waves using the Parallel Dichotomy Algorithm. *J. Comp. Phys.* Vol. 230. P. 1992–2003.
15. Terekhov A. V. (2015) Spectral-difference parallel algorithm for the seismic forward modeling in the presence of complex topography. *J. of Appl. Geoph.*, Vol. 115, pp. 206-219.
16. Vinnik L. P. (1977). Detection of waves converted from P to S in the mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 15, p. 39—45.
17. Karavaev D. A. (2009). Parallel implementation of the method of numerical simulation of wave fields in three-dimensional models of inhomogeneous media. *Bulletin of the Nizhny Novgorod State University named N.I. Lobachevsky*. № 6 (1). P. 203 – 209 [in Russian].
18. Levander, A. R. (1988). Fourth-order finite-difference P-SV seismograms, *Geophysics*, vol. 53, 1425–1436
19. Komatitsch D. and Martin R. (2007). An unsplit convolutional Perfectly Matched Layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation, *Geophysics*, vol. 72(5), p SM155-SM167.
20. Kovalevskiy V., Chimed O., Tubanov Ts., Braginskaya L., Grigoruk A., Fatyanov A. (2017). Vibroseismic sounding of the Earth's crust on the profile Baikal – Ulaanbaatar. *Proceedings of the International Conference on Astronomy & Geophysics in Mongolia 2017*, p. 261-265.

*© В. В. Ковалевский, А. Г. Фатьянов, Д. А. Караваев,  
А. В. Терехов, Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк, 2018*

## **АНАЛИЗ ДАННЫХ СЕТЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СУБМИКРОННЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ Г. НОВОСИБИРСКА**

### ***Ольга Владимировна Сересева***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-77-56, e-mail: seresseva@mail.ru

### ***Владимир Федотович Рапута***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

### ***Татьяна Владимировна Ярославцева***

ФБУН Новосибирский НИИ гигиены Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

### ***Алиса Максимовна Медвяцкая***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, аспирант, тел. (383)330-77-56, e-mail: medvyatskaya@mail.ru

### ***Павел Викторович Глотов***

АО «Тион Умный микроклимат», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Инженерная, 20, старший инженер, тел. (383)344-94-43, e-mail: glotov@tion.ru

Для контроля, прогнозирования и управления качеством атмосферного воздуха города необходимо создание достаточно плотной сети наблюдений и автоматизированный сбор данных мониторинга. В статье приведены результаты экспериментальных и численных исследований содержания субмикронных фракций аэрозоля в атмосферном воздухе г. Новосибирска. Методами статистического анализа исследованы закономерности выноса аэрозольных примесей с территорий города в точки наблюдения при различных направлениях ветра. В рамках линейного корреляционного анализа проведено сопоставление данных измерений субмикронных фракций аэрозоля (PM 2.5, PM 10) в атмосферном воздухе г. Новосибирска на сети автоматических станций. Установлены достаточно тесные корреляционные связи между компонентами, отражающими связь с близкими по аэрозольному составу источниками примесей, находящимися в окрестностях станций. Проведён сравнительный анализ данных измерений концентраций субмикронных фракций атмосферных аэрозолей в городе и текущих метеорологических условий. В ряде случаев установлены связи с источниками и суточной динамикой их выбросов, выявлены метеорологические условия при высоких уровнях аэрозольного загрязнения атмосферы. Особое внимание уделено эпизодам акцентированного поступления примесей в точки измерений от крупных теплоэлектроцентралей и автомагистралей города. Созданы возможности для решения обратных задач оценивания текущих параметров аэрозольных выбросов от конкретных источников, расположенных на территории г. Новосибирска.

**Ключевые слова:** городская атмосфера, мониторинг загрязнения, направление и скорость ветра, источники примеси, сектор выноса примеси, автомобильный транспорт, атмосферный аэрозоль, PM 2.5, PM 10, стационарный пункт измерений, статистический анализ.

## **ANALYSIS OF DATA FROM NETWORK OBSERVATIONS OF SUBMICRON AEROSOLS IN THE AIR OF NOVOSIBIRSK CITY**

### ***Olga V. Sereseva***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-77-56, e-mail: seresseva@mail.ru

### ***Vladimir F. Raputa***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

### ***Tatyana V. Yaroslavtseva***

FBSI «Novosibirsk scientific research institute of hygiene» of Rospotrebnadzor, 7 Parhomenko St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

### ***Alisa M. Medvyatskaya***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, phone: (383)330-77-56, e-mail: medvyatskaya@mail.ru

### ***Pavel V. Glotov***

JSC «Tion Smart Microclimate», 20 Engineering St., Novosibirsk, 630090, Russia, senior engineer, phone: (383)344-94-43, e-mail: glotov@tion.ru

To control, forecast and management the quality of atmospheric air of the city, it is necessary to create a dense network of observing stations and automated collection of monitoring data. This article presents the results of experimental and numerical studies of the content of submicron fractions of aerosol in the atmospheric air of Novosibirsk city. Regularities in the removal of aerosol admixtures from the city's areas to observation points under different wind directions were investigated. Within the framework of the linear correlation analysis, the measurements of submicron fractions of aerosol (PM 2.5, PM 10) in the atmospheric air of Novosibirsk on a network of automatic stations were compared. A comparative analysis of the measurements of the concentrations of submicron fractions of atmospheric aerosols in a city under the current meteorological conditions was carried out. Connections with sources and daily dynamics of their emissions were established. Particular attention was paid to episodes of incoming impurities to the observation points from large thermal power plants and motorways of the city. Opportunities to solve inverse problems of estimating the current parameters of aerosol emissions from specific sources located in the territory of Novosibirsk were created.

**Key words:** urban atmosphere, direction and speed of the wind, sources of impurities, impurity removal sector, automobile transport, atmospheric aerosol, submicron fractions, PM 2.5, PM 10, environmental monitoring.

## *Введение*

Исследование закономерностей и контроль процессов загрязнения атмосферного воздуха городов является актуальной задачей. Для этих целей на территории города создаются сети стационарных и передвижных пунктов измерения газового и аэрозольного состава атмосферы [1 - 6]. Спектр определяемых компонентов примеси может быть весьма обширным и включать десятки и сотни веществ в зависимости от специфики выбросов промышленных предприятий. К числу наиболее значимых компонентов относятся взвешенные вещества, а также характеристики их дисперсного состава. В состав взвешенных веществ могут входить тяжёлые металлы, сажа, полиароматические углеводороды. Углеродсодержащие частицы являются важными компонентами атмосферного аэрозоля [7 - 11]. К основным источникам поступления частиц элементарного углерода и органического углерода относится автотранспорт, котельные, ТЭЦ, промышленные предприятия. Эти примеси, находясь в атмосферном воздухе, оказывают влияние на иммунную систему и развитие онкогеноза [12 - 14].

Для диагностики и прогнозирования экологической ситуации в режиме реального времени необходимо создание достаточно плотной сети автоматических станций, что позволит локализовать источники и определить состав вредных примесей, а также прогнозировать в краткосрочной перспективе их концентрации в атмосферном воздухе города [1, 4, 9, 15]. В этом плане необходимо создание и развитие математических моделей оценивания параметров источников и непрерывного усвоения данных мониторинга, с учётом протекающих в городской атмосфере физических процессов, пространственного распределения и временной динамики выбросов источников [16 - 20]. В результате будут созданы реальные основания для принятия органами власти управленческих решений как оперативных (тактических), так и долгосрочных (стратегических) по улучшению экологической обстановки в городе. С другой стороны, для жителей города будет обеспечена возможность обоснованного выбора мест проживания, работы и отдыха.

### *Объекты и материалы исследования*

В настоящее время на территории г. Новосибирска функционирует сеть экспериментальных станций измерения в атмосферном воздухе концентраций субмикронных фракций аэрозолей с размером до 2.5 мкм (PM 2.5) и 10 мкм (PM 10). Сеть начала работать с февраля 2017 г. и в её состав входит 7 станций, расположение которых по территории города показано на рис. 1 (<https://cityair.ru>). Станции расположены на обширной территории города. Часть из них находится под непосредственным воздействием выбросов крупных автомагистралей (№№ 1, 4, 6). Станция № 2 расположена вблизи ТЭЦ 5. Станции с №№ 3, 7 испытывают значительное влияние выбросов промышленных предприятий, частного сектора, а также автотранспорта. Станция № 5 расположена на территории Технопарка г. Новосибирска.

Измерения концентраций РМ 2.5 и РМ 10 на станциях ведутся в непрерывном режиме с пятиминутным осреднением. Выбор такого интервала осреднения концентраций даёт возможность детально анализировать поступления примесей при различных скоростях и направлениях ветра, с учётом суточной динамики изменения эмиссии источников, в частности автотранспорта. Учитывая большое многообразие источников примесей на территории города и их структуру этого количества станций явно недостаточно для оперативной оценки текущих полей загрязнения. В этой связи в качестве дополнительного источника информации целесообразно использовать природные планшеты: снеговой, растительный и почвенный покровы [3].

Результаты измерений направлений и скоростей ветра были получены с сайта метеорологической станции, расположенной на юго-западной окраине Новосибирска в п. Огурцово ( $54^{\circ}90'N$ ,  $82^{\circ}95'E$ ) (<http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=29638>) [21]. Измерения параметров скорости ветра на ней проводятся 8 раз в сутки с трёхчасовым интервалом.

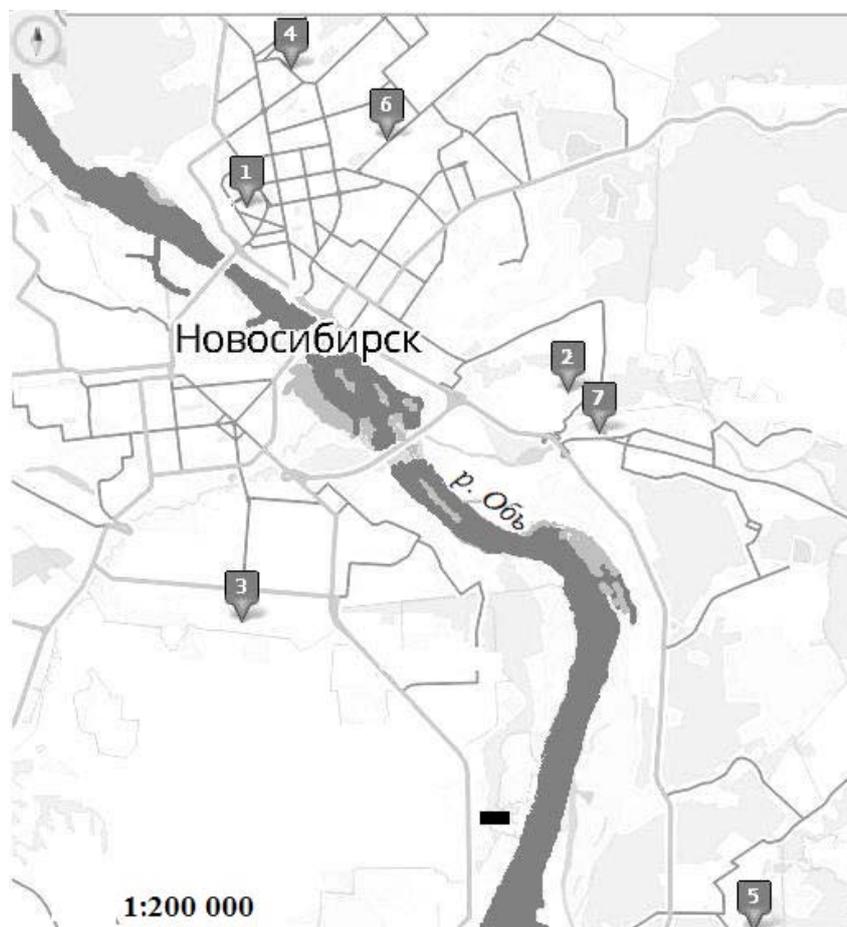


Рис. 1. Схема расположения автоматических станций измерений субмикронных аэрозолей в атмосферном воздухе г. Новосибирска:  
1 – ул. Сибирская 30; 2 – ул. Ключ-камышенское плато 11; 3 - ул. Зорге 42а;  
4 – ул. Залесского 6; 5 – ул. Инженерная 20; 6 – пр-т Дзержинского 16;  
7 – ул. Первомайская 224. ■ – метеостанция (п. Огурцово)

## Результаты и обсуждение

В табл. 1 и 2 представлены соответственно статистические характеристики данных измерений субмикронных фракций аэрозоля РМ 2.5 и РМ 10 в г. Новосибирске на сети автоматических станций за период 3.02.2017 г. по 30.11.2017 г. Наибольшее среднее значение характеристики РМ 2.5 наблюдается на станции пр-т Дзержинского, 16, наименьшее – на станции Сибирская, 30 (16.9 и 11.7 соответственно). Наибольшее среднее значение характеристики РМ 10 наблюдается на станции ул. Залесского, 6, наименьшее – на двух станциях Сибирская, 30 и ул. Ключ-Камышенское Плато, 11 (16.9 и 11.7 соответственно). Высокие значения характеристик РМ 2.5 и РМ 10 на станциях пр-т Дзержинского, 16 и ул. Залесского, 6 вероятно обусловлено близостью расположения автомагистралей и частного сектора.

Таблица 1

Статистические характеристики данных РМ 2.5 г. Новосибирске

Станция	Min	Max	Ср. знач.	С.К.О.	Мода	Асимм.	Эксцесс
Сибирская, 30	0.1	150.4	11.7	11.3	3.2	2.5	14.2
Кл.-К. Пл. 11	0.4	920.8	13.7	14.7	4.9	16.7	748.3
Зорге 42а	0.3	712.1	14.6	15.9	4.0	7.7	170.2
Залесск. 6, к.14	1.1	999.9	14.3	15.1	6.1	12.6	473.2
Инженерн., 20	0.5	999.9	12.1	24.5	4.7	19.1	463.1
пр. Дзерж. 16	0.2	344	16.9	17.1	8.3	4.5	34.9
Перв. 224	0.1	507.4	16.5	22.2	5.1	4.7	38.6

Таблица 2

Статистические характеристики данных РМ 10 в г. Новосибирске

Станция	Min	Max	Ср. знач.	С.К.О.	Мода	Асимм.	Эксцесс
Сибирская, 30	0.1	174.7	15.2	14.9	3.6	2.3	11.9
Кл.-К. Пл. 11	0.5	137.1	15.2	17.7	5.2	26.8	1614.3
Зорге 42а	0.4	747.7	16.4	17.6	8.7	7.1	145.4
Залесск. 6, к.14	5	1999.9	46.1	25.8	42.2	18.3	883.3
Инженерн., 20	0.6	1999.9	15.5	69.7	4.8	23.6	597.9
пр. Дзерж. 16	0.8	915.2	19.1	20.4	10.1	5.7	88.7
Перв. 224	0.1	685.6	19.2	25.3	5.7	5.3	52.8

Для выявления связей с городскими источниками аэрозольных примесей и их характеристиками данные измерений на станциях были усреднены до трехчасовых интервалов времени в соответствии со сроками наблюдений ветра на метеостанции Огурцово. Это позволило провести анализ выносов с различных направлений субмикронных аэрозольных фракций в точки измерений.

На рис. 2 представлены графики попарной корреляции между PM 2.5 и PM 10 на ул. Сибирская, 30 для четырёх направлений ветра: западного, восточного, северного и южного.

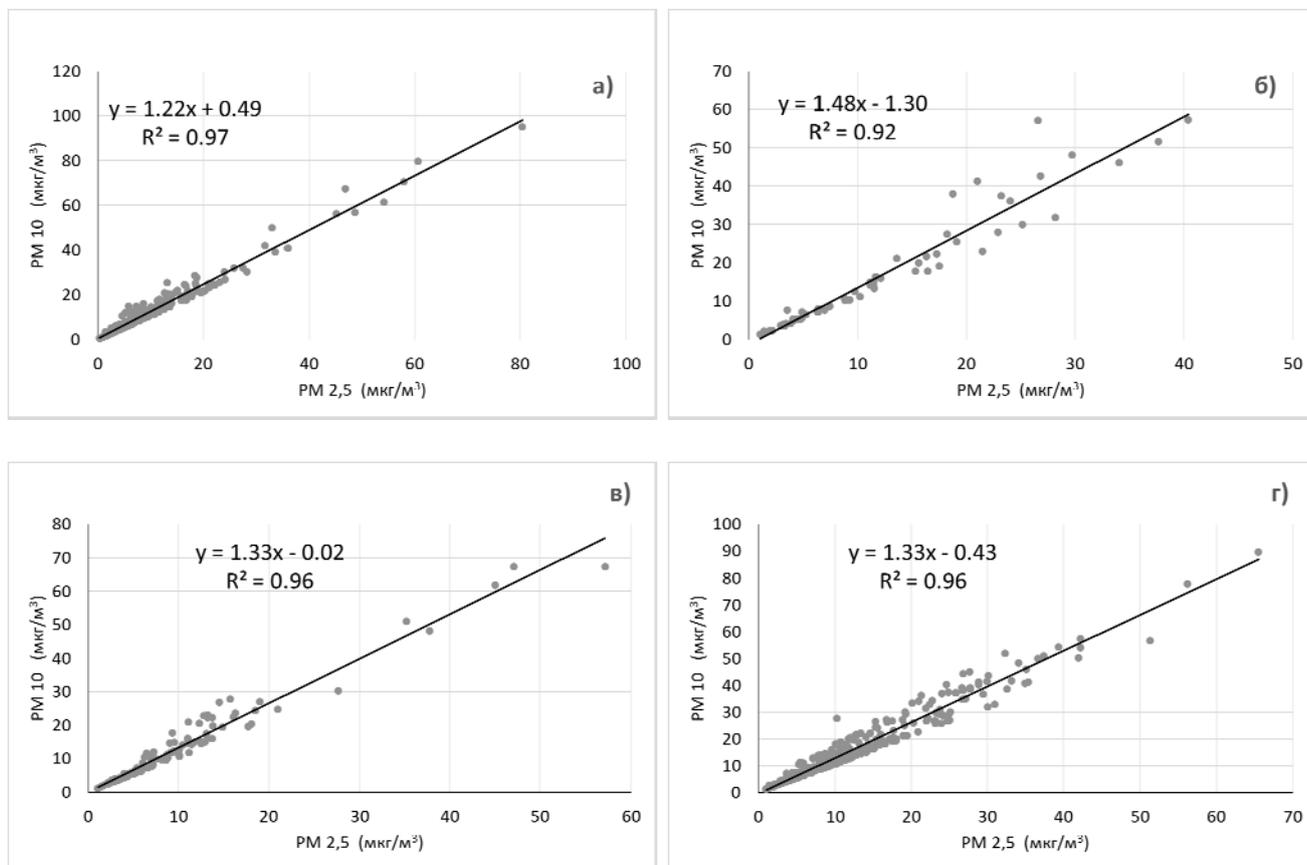


Рис. 2. Линейно-корреляционные связи между измеренными концентрациями PM 2.5 и PM 10 (мкг/м<sup>3</sup>) на ул. Сибирская, 30 в период с 3.02 по 5.12.2017 г. при западном (а), восточном (б), северном (в) и южном (г) направлениях ветра

Из рис. 2 вытекает, что в целом уровень корреляционных связей между аэрозольными компонентами достаточно высокий, что, в свою очередь, указывает на единство их источников. В данном случае преобладающими являются выбросы автотранспорта. Наблюдается также определённая близость соответствующих угловых коэффициентов линейных регрессий. Если исходить из рис. 2б – 2г, вполне возможно также ограниченное присутствие и других источников. Концентрация PM 10 оказалась несколько выше, чем PM 2.5.

Аналогичная картина имеет место и для других пунктов наблюдений. Количественные же различия в уровнях концентраций могут быть существенными. Как, например, для станции, расположенной на ул. Первомайская 224. Следует также отметить, что для станции по ул. Залесского 6 коэффициент детерминации между компонентами заметно ниже ( $R^2 = 0.61$ ), чем для остальных станций. Причиной этому может оказаться большая разнородность источников.

На рис. 3 сопоставлены результаты измерений концентрации РМ 2.5 на станциях № 1, 6 и 7 за ноябрь 2017 г.

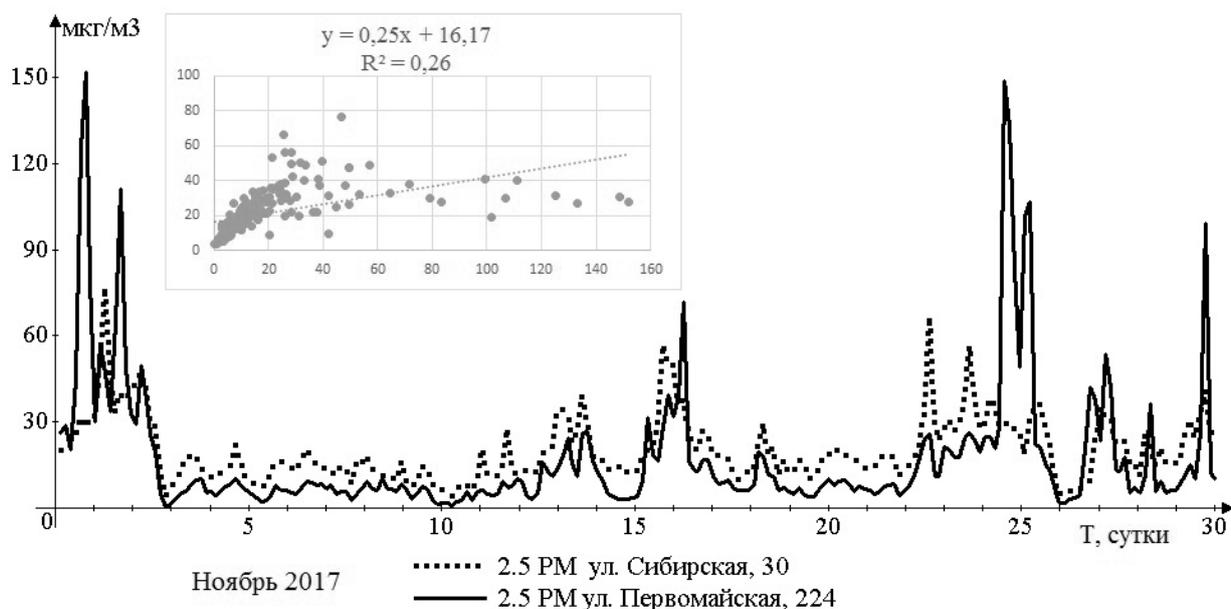
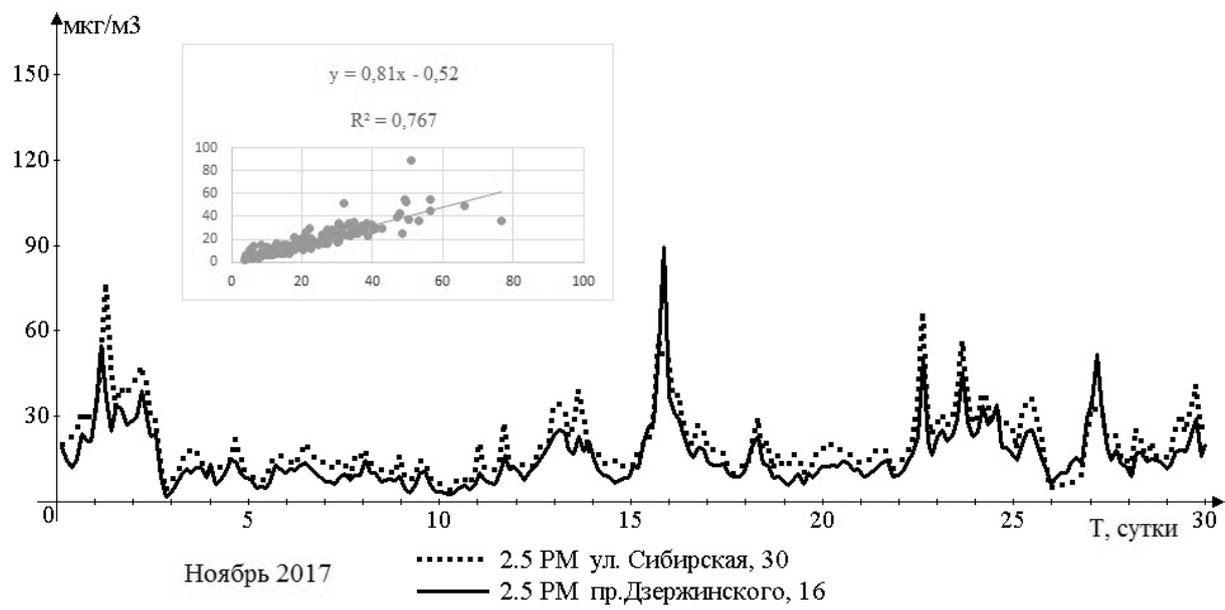


Рис. 3. Временная динамика изменения концентраций РМ 2.5 (мкг/м3) в Новосибирске в ноябре 2017 г. на станциях ул. Сибирская, 30 и пр-т Дзержинского, 16 (а), ул. Сибирская, 30 и ул. Первомайская, 224 (б)

Анализ рис. 3а показывает, что между измерениями на станциях по ул. Сибирская, 30 и ул. Дзержинского, 16 наблюдается определённое согласие как по динамике изменения концентраций, так и их значениям. Это может быть обусловлено рядом причин: наличием единого источника (автотранспорта), отно-

сительной пространственной близостью станций и их расположенностью на линии преобладающих ветров.

Рис. 3б показывает, что динамика изменений концентраций на ул. Первомайская 30 существенно отличается от предыдущих станций. В первую очередь, это связано с совсем иной пространственной структурой близко расположенных источников. С южной стороны находится крупный железнодорожный узел, Стрелочный и Электровозоремонтный заводы. С северной стороны расположена ТЭЦ – 5. Поэтому кроме выбросов автотранспорта присутствует дополнительный вклад и этих источников. Следует также отметить, что высокие пики концентраций РМ 2.5, наблюдавшиеся 1, 2, 16, 30 ноября, возникли при практически штилевых условиях, а пики 24, 25 ноября наблюдались при южном и юго-западном ветре. Для дальнейшего изучения природы возникновения этих концентраций необходимо привлечение более полной информации, включающей сведения о направлении и скорости ветра, состоянии устойчивости приземного и пограничного слоя атмосферы, расположении и режимах функционирования источников РМ 2.5 и РМ 10.

### *Заключение*

Проведён статистический анализ данных измерений субмикронных фракций аэрозоля (РМ 2.5, РМ 10) в атмосферном воздухе г. Новосибирска на сети автоматических станций. Для каждой из станций установлены достаточно тесные линейные корреляционные связи между компонентами. Полученные зависимости могут быть обусловлены близкими по аэрозольному составу источниками примесей, находящимися в окрестностях станций. В первую очередь это относится к автомобильному транспорту.

Весьма информативным является развитие совместного анализа данных измерений концентраций субмикронных фракций атмосферных аэрозолей в городе и текущих метеорологических условий. Он позволяет установить связи с источниками, изучать суточную динамику их выбросов, выявлять метеорологические условия, способствующие высоким уровням загрязнения городской атмосферы. Особое внимание следует уделять эпизодам акцентированного поступления примесей в пункт наблюдения от значимых источников - крупных ТЭЦ и автомагистралей города. В дальнейшей перспективе на этой основе создаются возможности постановок обратных задач для оценки параметров аэрозольных источников на территории г. Новосибирска.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ и правительства Новосибирской области (грант № 17-47-540342, 17-41-543338 р\_мол\_a).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безуглая Э.Ю., Чичерин С.С., Шарикова О.П. Состояние и перспективы сети мониторинга атмосферы в городах // Труды ГГО. - Л.: Гидрометеиздат. 1998. - Вып. 549. - С. 3-10.

2. Hu J., Wang Y., Ying Q., and Zhang H. Spatial and temporal variability of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China. // *Atmos. Environ.* – 2014. – 95. – 598–609. – <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.019>.
3. Masiol M., Benetello F., Harrison R. M., Formenton G., Gaspari F. D., and Pavoni B. Spatial, seasonal trends and transboundary transport of PM<sub>2.5</sub> inorganic ions in the Veneto region (Northeastern Italy). *Atmos. Environ.* 2015. – 117. – 19–31. – doi:10.1016/j.atmosenv.2015.06.044.
4. Samara C., Voutsas D., Kouras A., Eleftheriadis K., Maggos T., Saraga D., Petrakakis M. Organic and elemental carbon associated to PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> at urban sites of northern Greece. // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2014. – 21. – P.1769–1785.
5. Pekney N.J., Davidson C.I., Zhou L., Hopke P.K. Application of PSCF and CPF to PMF-Modeled Sources of PM<sub>2.5</sub> in Pittsburgh // *Aerosol Science and Technology*. 2006. – V. 40. – P. 952-961.
6. Raputa V.F., Yaroslavtseva T.V. Numerical analysis of experimental studies of atmosphere deposition of contaminants in the vicinity of the Novosibirsk city // *Bulletin NCC. Ser.: Numerical Analysis.* – 2017. – Vol. 16. – P. 57–65.
7. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Васильев А.В., Горчакова И.А. Коричневый и черный углерод в смогах мегаполисов // *Оптика атмосферы и океана.* - 2017. - Т. 30. - № 01. - С. 5-11.
8. Targino A. C., Gibson M. D., Krecl P., Rodrigues M. V. C., dos Santos M. M., and de Paula Corrêa M. Hotspots of black carbon and PM<sub>2.5</sub> in an urban area and relationships to traffic characteristics. // *Environ. Pollut.* – 2016. – 218. – P.475–486. – doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.027.
9. Uwayemi M. Sofowote, Ankit K. Rastogi, Jerzy Deboz, Philip K. Hopke. Advanced receptor modeling of near-real-time, ambient PM<sub>2.5</sub> and its associated components collected at an urban-industrial site in Toronto, Ontario // *Atmospheric Pollution Research.* – 2014. V.5. P. 13-23.
10. Рапута В.Ф., Попова С.А., Макаров В.И., Ярославцева Т.В. Определение связей органического и элементного углерода по секторам выноса атмосферных примесей // *Оптика атмосферы и океана.* – 2017. – Т. 30. – № 10. – С. 878–882.
11. Bigi A. and Ghermandi G. Long-term trend and variability of atmospheric PM<sub>10</sub> concentration in the Po Valley // *Atmos. Chem. Phys.* – 2014. – 14. – P. 4895–4907. – doi:10.5194/acp-14-4895-2014.
12. Bell M. L., Ebisu K., Leaderer B. P., Gent J. F., Lee H. J., Koutrakis P., Wang Y., Dominici F., and Peng R. D. Associations of PM<sub>2.5</sub> Constituents and Sources with Hospital Admissions, Analysis of Four Counties in Connecticut and Massachusetts (USA) for Persons  $\geq$  65 Years of Age // *Environ. Health Persp.* – 2014. – 122. – P. 138–144. – <https://doi.org/10.1289/ehp.1306656>.
13. Reche C., Moreno T., Amato F., Viana M., van Drooge B. L., Chuang H.-C., Bérubé K., Jones T., Alastuey A., and Querol X. A multidisciplinary approach to characterise exposure risk and toxicological effects of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> samples in urban environments. // *Ecotox. Environ. Safe.* – 2012. – 78. – P. 327–335. – <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.043>.
14. Gao J., Peng X., Chen G., Xu J., Shi G. L., Zhang Y. C. and Feng Y. C. Insights into the chemical characterization and sources of PM<sub>2.5</sub> in Beijing at a 1- h time resolution. // *Sci. Total Environ.* – 2016. – 542. – P. 162–171. – <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.082>.
15. Cesari D., De Benedetto G.E., Bonasoni P., Busetto M., Dinoi A., Merico E., Chirizzi D., Cristofanelli P., Donato A., Grasso F.M. et al. Seasonal variability of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> composition and sources in an urban background site in Southern Italy. // *Sci. Total Environ.* – 2018. – 612. – P. 202–213.
16. Mu Q. and Liao H. Simulation of the interannual variations of aerosols in China: role of variations in meteorological parameters. // *Atmos. Chem. Phys.* – 2014. – 14. P. 9597–9612. – doi:10.5194/acp-14-9597-2014.
17. Yin X., Huang Z., Zheng J., Yuan Z., Zhu W., Huang X. and Chen D. Source contributions to PM<sub>2.5</sub> in Guangdong province, China by numerical modeling: Results and implications. // *Atmos. Res.* – 2017. – 186. – P. 63–71. – <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.11.007>, 2017.

18. Кузнецова И. Н., Коновалов И. Б., Глазкова А. А., Нахаев М. И., Зарипов Р. Б., Лезина Е. А., Звягинцев А. М., Бикманн М. Наблюдаемая и рассчитанная изменчивость концентрации взвешенного вещества  $PM_{10}$  в Москве и Зеленограде // *Метеорология и гидрология*. – 2011. – № 3. – С. 48-60.
19. Contini D., Cesari D., Conte M., Donato A. Application of PMF and CMB Receptor Models for the Evaluation of the Contribution of a Large Coal-Fired Power Plant to  $PM_{10}$  Concentrations. // *Sci. Total Environ.* – 2016. – 560. – P. 131–140.
20. Kim Oanh N. T., Thiansathit W., Bond T. C., Subramanian R., Winijkul E., and Pawarmart I. Compositional characterization of  $PM_{2.5}$  emitted from in-use diesel vehicles. // *Atmos. Environ.* – 2009. – 44. – P. 15–22. – <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.005>.
21. Климат Новосибирска и его изменения // И.О. Лучицкая, Н.И. Белая, С.А. Арбузов. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. - 224 С.

## REFERENCES

1. Bezuglaya, E.Yu., Chicherin, S.S., Sharikova, O.P. (1998). Status and prospects of the atmosphere monitoring network in cities. Proceedings of the GGO. L.: Gidrometeoizdat. Iss. 549. P. 3-10 [in Russian].
2. Hu, J., Wang, Y., Ying, Q. and Zhang, H. (2014). Spatial and temporal variability of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China. *Atmos. Environ.* 95, 598–609. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.019>.
3. Masiol, M., Benetello, F., Harrison, R. M., Formenton, G., Gaspari, F. D. and Pavoni, B. (2015). Spatial, seasonal trends and transboundary transport of  $PM_{2.5}$  inorganic ions in the Veneto region (Northeastern Italy). *Atmos. Environ.*, 117, 19–31, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.06.044.
4. Samara, C., Voutsas, D., Kouras, A., Eleftheriadis, K., Maggos, T., Saraga, D., Petrakakis, M. (2014). Organic and elemental carbon associated to  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  at urban sites of northern Greece. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 21. P. 1769–1785.
5. Pekney, N.J., Davidson, C.I., Zhou, L., Hopke, P.K. (2006). Application of PSCF and CPF to PMF-Modeled Sources of  $PM_{2.5}$  in Pittsburgh. *Aerosol Science and Technology*. V. 40. P. 952-961.
6. Raputa, V.F., Yaroslavtseva, T.V. (2017). Numerical analysis of experimental studies of atmosphere deposition of contaminants in the vicinity of the Novosibirsk city. *Bulletin NCC. Ser.: Numerical Analysis*. Vol. 16. P. 57–65.
7. Gorchakov, G.I., Karpov, A.V., Vasiliev, A.V., Gorchakova, I.A. (2017). Brown and black carbon in the smogs of megacities. *Optics of the atmosphere and ocean*. V. 30. № 01. P. 5-11 [in Russian].
8. Targino, A. C., Gibson, M. D., Krecl, P., Rodrigues, M. V. C., dos Santos, M. M. and de Paula Corrêa, M. (2016). Hotspots of black carbon and  $PM_{2.5}$  in an urban area and relationships to traffic characteristics. *Environ. Pollut.* 218, 475–486, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.027>.
9. Uwayemi, M. Sofowote, Ankit, K. Rastogi, Jerzy, Deboz, Philip, K. Hopke (2014). Advanced receptor modeling of near-real-time, ambient  $PM_{2.5}$  and its associated components collected at an urban-industrial site in Toronto, Ontario. *Atmospheric Pollution Research*. V.5. P. 13-23.
10. Raputa, V.F., Popova, S. A., Makarov, V. I., Yaroslavtseva, T.V. (2017). Determination of organic and elemental carbon connections on removal segments of atmospheric impurities. *Optics of the atmosphere and ocean*. V. 30. № 10. P. 878–882 [in Russian].
11. Bigi, A. and Ghermandi, G. (2014). Long-term trend and variability of atmospheric  $PM_{10}$  concentration in the Po Valley. *Atmos. Chem. Phys.* V. 14. P. 4895–4907. doi:10.5194/acp-14-4895-2014.
12. Bell, M. L., Ebisu, K., Leaderer, B. P., Gent, J. F., Lee, H. J., Koutrakis, P., Wang, Y., Dominici, F., and Peng, R. D. (2014). Associations of  $PM_{2.5}$  Constituents and Sources with Hospital Admissions: Analysis of Four Counties in Connecticut and Massachusetts (USA) for Persons  $\geq 65$  Years of Age. *Environ. Health Persp.* V. 122. P. 138–144. <https://doi.org/10.1289/ehp.1306656>.

13. Reche, C., Moreno, T., Amato, F., Viana, M., van Drooge, B. L., Chuang, H.-C., Bérubé, K., Jones, T., Alastuey, A., and Querol, X. (2012). A multidisciplinary approach to characterise exposure risk and toxicological effects of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> samples in urban environments. *Ecotox. Environ. Safe.* V. 78. P. 327–335. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.043>.
14. Gao, J., Peng, X., Chen, G., Xu, J., Shi, G. L., Zhang, Y. C., and Feng, Y. C. (2016). Insights into the chemical characterization and sources of PM<sub>2.5</sub> in Beijing at a 1- h time resolution. *Sci. Total Environ.* V. 542. P. 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.082>.
15. Cesari, D., De Benedetto, G.E., Bonasoni, P., Busetto, M., Dinoi, A., Merico, E., Chirizzi, D., Cristofanelli, P., Donato, A., Grasso, F.M., et al. (2018). Seasonal variability of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> composition and sources in an urban background site in Southern Italy. *Sci. Total Environ.* V. 612. P. 202–213.
16. Mu, Q. and Liao, H. (2014). Simulation of the interannual variations of aerosols in China: role of variations in meteorological parameters. *Atmos. Chem. Phys.* V. 14. P. 9597–9612. [doi:10.5194/acp-14-9597-2014](https://doi.org/10.5194/acp-14-9597-2014).
17. Yin, X., Huang, Z., Zheng, J., Yuan, Z., Zhu, W., Huang, X., and Chen, D. (2017). Source contributions to PM<sub>2.5</sub> in Guangdong province, China by numerical modeling: Results and implications. *Atmos. Res.* V. 186. P. 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.11.007>.
18. Kuznetsova, I. N., Konovalov, I. B., Glazkova, A. A., Nahaev, M. I., Zaripov, R. B., Lezina, E. A., Zvyagintsev, A. M., Bickmann, M. (2011). Observed and calculated variability of the concentration of suspended matter PM<sub>10</sub> in Moscow and Zelenograd. *Meteorology and hydrology.* № 3. P. 48-60 [in Russian].
19. Contini, D., Cesari, D., Conte, M., Donato, A. (2016). Application of PMF and CMB Receptor Models for the Evaluation of the Contribution of a Large Coal-Fired Power Plant to PM<sub>10</sub> Concentrations. *Sci. Total Environ.* V. 560. P. 131–140.
20. Kim Oanh, N. T., Thiansathit, W., Bond, T. C., Subramanian, R., Winijkul, E., and Pawarmart, I. (2009). Compositional characterization of PM<sub>2.5</sub> emitted from in-use diesel vehicles. *Atmos. Environ.* V. 44. P. 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.005>.
21. Luchitskaya, I. O., Belaya, N.I., Watermelon, S.A. (2014). The climate of Novosibirsk and its changes. Novosibirsk: Publ. SB RAS. 224 P. [in Russian].

© О. В. Сересева, В. Ф. Ратута, Т. В. Ярославцева,  
А. М. Медвяцкая, П. В. Готов, 2018

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РТУТИ В ОКРЕСТНОСТЯХ НОВОСИБИРСКОГО ЗАВОДА ХИМКОНЦЕНТРАТОВ**

### ***Владимир Федотович Рапута***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

### ***Дмитрий Валерьевич Юсупов***

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, тел. (3822)41-89-10, e-mail: yusupovd@mail.ru

### ***Татьяна Владимировна Ярославцева***

ФБУН Новосибирский НИИ гигиены, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

### ***Елена Евгеньевна Ляпина***

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, тел. (3822)49-26-81, e-mail: eeldv@mail.ru

### ***Елена Муратовна Турсуналиева***

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, аспирант, тел. (3822)41-89-10, e-mail: tursunalieva.em@gmail.com

Рассмотрена актуальная задача определения содержания ртути в окрестностях Новосибирского завода химконцентратов по данным биогеохимического мониторинга. Приведены результаты полевой съемки и химико-аналитических исследований содержания ртути в листьях тополя. Предложены методы численного анализа процесса ветрового подхвата пыли с поверхности площадного источника загрязнения территории. Ранее по данным геохимических исследований почво-грунтов на промышленной площадке были установлены аномалии ртутного загрязнения. Проведено численное восстановление уровней её концентрации по направлениям выноса с использованием ограниченного числа опорных точек наблюдений. На основе экспериментальных исследований и результатов численных данных показано, что в летние месяцы 2017 г. (май, июнь, июль), основное рассеяние ртути произошло в северо-западном секторе и охватило значительную территорию города. Из приведённых параметров модели оценивания вытекает, что эффективная высота подъёма пыли может достигать нескольких десятков метров. Необходимо проведение дальнейших комплексных исследований выявленной крупной техногенной аномалии ртути в северо-восточной части г. Новосибирска.

**Ключевые слова:** атмосфера, метеорологические условия, взвешенные вещества, ртуть, ПАО «НЗХК», биогеохимическая индикация, листья тополя, площадной источник загрязнения, модель, параметр, численное моделирование.

## EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL ANALYSIS OF MERCURY DISTRIBUTION AROUND THE NOVOSIBIRSK CHEMICAL CONCENTRATES PLANT

### *Vladimir F. Raputa*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

### *Dmitry V. Yusupov*

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Prospect St., Tomsk, 634050, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (3822)41-89-10, e-mail: yusupovd@mail.ru

### *Tatyana V. Yaroslavtseva*

FBSI «Novosibirsk scientific research institute of hygiene» of Rospotrebnadzor, 7, Parhomenko, Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

### *Elena E. Lyapina*

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System of SB of RAS, 10/3, Academichesky avenue, Tomsk, 634055, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (3822)49-26-81, e-mail: eeldv@mail.ru

### *Elena M. Tursunaliyeva*

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Prospect St., Tomsk, 634050, Russia, Ph. D. Student, phone: (3822)41-89-10, e-mail: tursunaliyeva.em@gmail.com

The actual problem of determining the mercury content around the Novosibirsk Chemical Concentrates Plant according to biogeochemical monitoring is considered. The results of field contouring and chemical-analytical studies of mercury content in poplar leaves are presented. Methods of numerical analysis of the process of wind dust taking from the surface of the territory contamination area source are proposed. Earlier, according to geochemical studies of soils on the industrial site were established the anomalies of mercury pollution. The numerical recovery of its concentration levels in the directions of removal using a limited number of reference points of observations is carried out. Based on experimental studies and numerical data, it was shown that in the summer months of 2017 (May, June, July), the main mercury emission occurred in the north-western sector and covered significant areas of the city. From the above parameters of the estimation model it follows that the effective height of the dust rise can reach several tens of meters. It is necessary to carry out further complex studies of the identified large technogenic anomaly of mercury in the north-eastern part of Novosibirsk.

**Key words:** atmosphere, meteorological conditions, suspended matter, mercury, PJSC «NCCP», biogeochemical indication, poplar leaves, area contamination source, model, parameter, numerical simulation.

### *Введение*

Ртуть и её соединения являются одними из самых опасных загрязняющих примесей, поступающих в окружающую среду. Это определяется рядом ее токсикологических и геохимических характеристик. В 2014 г. Подписанный в 2014 г. Россией межгосударственный документ - Минаматская конвенция по

ртути предусматривает всеобъемлющий контроль и поэтапный отказ от ее использования [1].

В этой связи актуальной задачей является определение содержания этого металла и его соединений с помощью современных аналитических методов в различных средах: атмосферном воздухе [2–3], почве, воде [4], растительном [5] и снежном покрове [6]. Для оценки антропогенных воздействий в системе комплексного мониторинга возможно использование метода биогеохимической индикации [7–8].

Механизмы загрязнения атмосферы в результате ветровой миграции примесей от неорганизованных площадных источников до сих пор изучены в недостаточной степени и зависят от значительного числа факторов, обладающих большой пространственно-временной изменчивостью. К ним, в первую очередь, относится текущая эмиссия источников и эффективная высота подъема примеси, характеристики дисперсного состава аэрозольных частиц. Сами они определенным образом зависят от текущих метеорологических условий, состояния почвенного покрова и растительности, сорбционных свойств примеси на поверхности и т.д. Также необходимы дальнейшие исследования механизмов ветрового подъема примеси с подстилающей поверхности [9]. В данной ситуации применение методов прямого моделирования для описания процессов распространения примеси весьма затруднительно. Также проблематично получение достоверной картины загрязнения территорий лишь на основе данных натурных наблюдений, что в значительной степени связано с их трудоёмкостью и фрагментарностью.

Для выхода из такого положения целесообразен подход, основанный на разработке компромиссных моделей с использованием имеющиеся данные натурных наблюдений и с учётом теоретических описаний процессов распространения примеси, а также дополнительной априорной информации о характеристиках источников, дисперсном составе примесей, метеорологических условиях. Создание такого рода моделей для оценивания полей концентраций примеси позволяет более надёжно контролировать процессы и характеристики техногенного загрязнения местности [10].

Цель и задачи исследования – определение содержания ртути в окрестностях Новосибирского завода химконцентратов (НЗХК) по данным изучения листьев тополя – биогеохимического индикатора, и разработка методов численного анализа данных экспериментальных исследований загрязнения атмосферными выбросами ртути на территории города от нерегулярного площадного источника.

### ***Объекты и методы исследования***

В число самых крупных и высокотехнологичных промышленных предприятий г. Новосибирска входит предприятие ядерно-топливного цикла – Публичное акционерное общество «Новосибирский завод химконцентратов» (ПАО «НЗХК») и дочернее общество ТК «ТВЭЛ» Госкорпорации «Росатом». Про-

мышленная площадка с основными и вспомогательными производствами занимает территорию более 120 га и расположена на территории Калининского района в северо-восточной части г. Новосибирска. К территории ПАО «НЗХК» также относится хвостохранилище с площадью около 240 га, которое находится на расстоянии 5,3 км к северо-востоку от основной промышленной площадки завода [11].

Производственный комплекс данного предприятия выпускает топливо для атомных электростанций и тепловыделяющие сборки для исследовательских реакторов, включает производство лития и его соединений. При производстве лития используется ртуть в качестве катодного элемента. Суммарные атмосферные выбросы ртути ПАО «НЗХК» за период 2010-2015 гг. составили – 0,574 тонны. Наибольшее количество выбросов ртути произошло в 2013 году. В последние годы фиксируется устойчивая тенденция к сокращению выбросов, которые в 2015 г. снизились до 10 кг [11].

На рис. 1 представлены результаты экспериментальных исследований содержания ртути (мкг/кг) в верхнем слое почвы на промплощадке НЗХК и выделены основные очаги загрязнения [12].

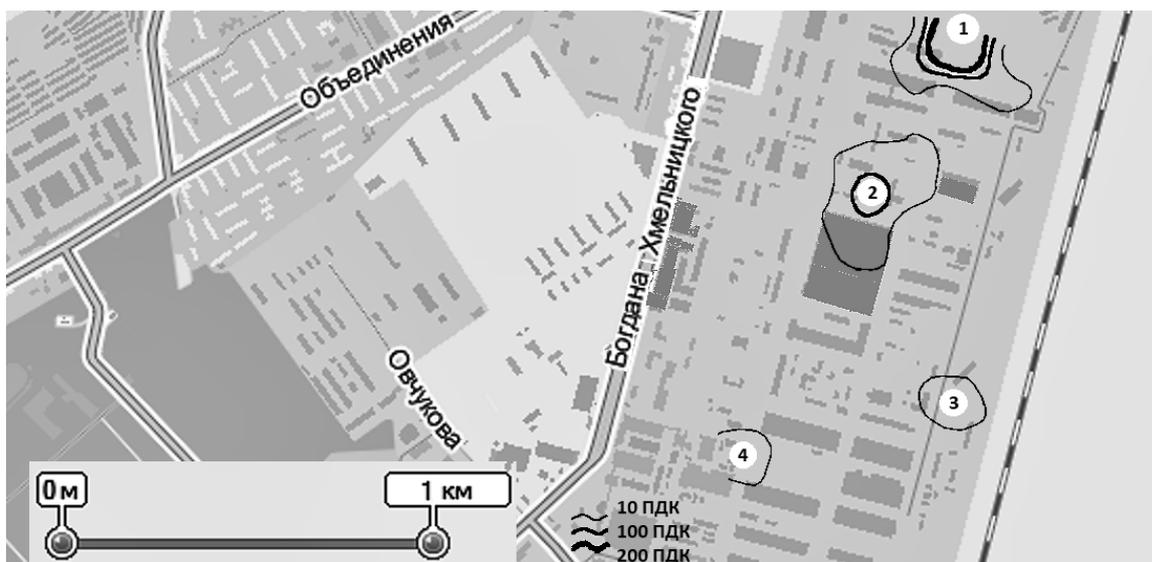


Рис. 1. Содержание ртути (мкг/кг) в верхнем слое почвы на промплощадке НЗХК. 1 – 4 – положение основных очагов загрязнения

Объектом экспериментальных исследований служили листья тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), повсеместно присутствующего в озеленительных насаждениях г. Новосибирска. Следует отметить, что листья тополя являются эффективным природным планшетом. Из-за большой площади листовой поверхности, особого морфологического и анатомического строения, листья тополя являются сезонным накопителем макро- и микроэлементов [13], газообразных [14] и аэрозольных атмосферных примесей [15]. Они могут эффек-

тивно использоваться в биогеохимическом мониторинге окружающей среды на урбанизированных территориях [16–18].

Для оценки валового содержания и распределения ртути на территории Калининского и Дзержинского районов г. Новосибирска в конце июля 2017 г. опробованы листья тополя по равномерной сети 1×1 км со сгущением до 500 м вблизи границы промышленной площадки НЗХК (рис. 2).

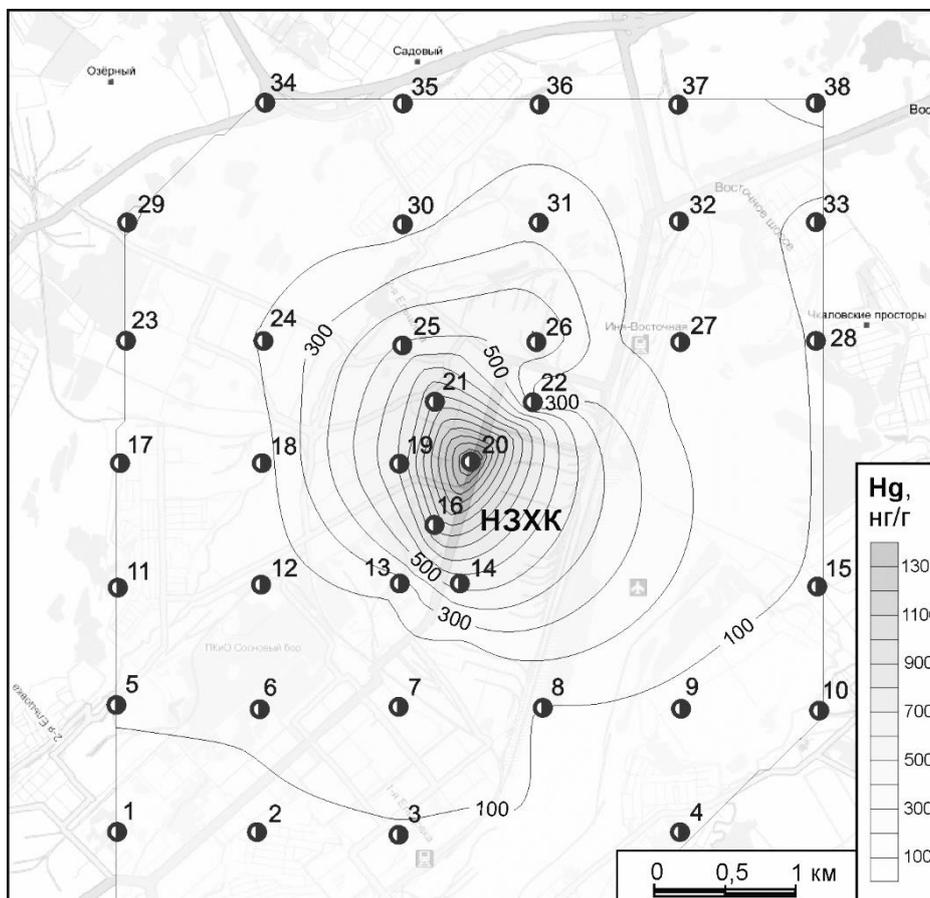


Рис. 2. Схема отбора листьев тополя в северо-восточной части г. Новосибирска. Биогеохимический ореол ртути в зоне влияния НЗХК по данным опробования листьев тополя

Всего отобрано и проанализировано 38 проб. Инструментальный анализ содержания ртути в образцах сухой массы листьев тополя проводился на анализаторе «РА-915+» с приставкой «ПИРО-915+» методом атомной абсорбции. Предел обнаружения составлял 5 нг/г. Для контроля градуировочных параметров при определении массового содержания ртути использовался стандартный образец состава «лист березы» (ГСО 8923-2007).

Модель оценивания поля концентрации в окрестностях площадного источника основана на принципе суперпозиции полей концентраций от точечных источников [19]. Положения точечных источников совпадают с очагами загрязнения территории НЗХК в соответствии с рис. 1. Совокупное действие этих ис-

точников соответствующей интенсивности приближённо приравняется к действию площадного источника. Суммарное поле концентрации можно представить в виде

$$F(x, y, \vec{\theta}) = \sum_{i=1}^N \theta_i f_i(x, y), \quad (1)$$

где  $\theta_i$  – интенсивность пыления  $i$  – го источника,  $f_i(x, y)$  – поле концентрации, создаваемое  $i$  – м источником единичной мощности.

Оценивание поля концентрации может быть существенно упрощено, если ограничиться одним доминирующим очагом пыления и определённым направлением от него выноса пыли. В этом случае формула для оценивания поля концентрации приобретает следующий вид [19, 20]

$$P(r, \theta, s) = \frac{\theta}{r^2} e^{-\frac{s}{r}}, \quad (2)$$

где  $r$  – расстояние до очага,  $\theta$  – суммарная интенсивность пыления за рассматриваемый промежуток времени,  $s$  – величина, связанная с эффективной высотой подъёма пыли.

Неизвестные параметры  $\theta$ ,  $s$  являются агрегированными величинами и их оценка может быть получена по данным мониторинга, например, методом наименьших квадратов с использованием не менее двух точек наблюдения.

### **Результаты**

В таблице приведены расстояния от точек наблюдений в северной части области отбора проб до основных очагов загрязнения ртутью промплощадки НЗХК и данные химико-аналитических исследований.

*Таблица*

Содержание ртути в точках отбора проб и расстояния от них до основных очагов загрязнения промплощадки НЗХК

№ точки	Очаг 1, км	Очаг 2, км	Очаг 3, км	Очаг 4, км	Содержание ртути, нг/г
17	3,88	3,7	4,05	3,58	121,7
18	2,58	2,43	2,84	2,42	129,1
19	1,34	1,27	1,79	1,56	700,2
20	0,72	0,82	1,42	1,4	1715,0
21	1,29	1,45	2,05	1,99	928,3
22	0,82	1,25	1,8	2,01	191,9
23	4,07	4,02	4,48	4,1	168,4
24	2,93	2,95	3,49	3,21	202,1
25	1,88	2,07	2,67	2,59	498,1
26	1,39	1,81	2,37	2,56	512,6
27	1,86	2,32	2,68	3,09	143,3

№ точки	Очаг 1, км	Очаг 2, км	Очаг 3, км	Очаг 4, км	Содержание ртути, нг/г
28	2,89	3,31	3,48	4,0	91,5
29	4,58	4,63	5,16	4,86	82,9
30	2,8	3,09	3,69	3,68	145,8
31	2,49	2,91	3,47	3,65	253,3
32	2,78	3,25	3,69	4,04	142,4
33	3,56	4,01	4,31	4,77	73,5
34	4,43	4,64	5,25	5,12	163,5
35	3,83	4,15	4,76	4,78	205,7
36	3,6	4,02	4,58	4,75	129,0
37	3,79	4,25	4,73	5,04	143,6
38	4,4	4,88	5,24	5,65	257,5

По результатам определения ртути в точках отбора проб построено интерполяционное поле её концентрации в окрестности промплощадки НЗХК (рис. 2).

Численно восстановленные с использованием модели (2) концентрации ртути в листьях по основным направлениям выноса представлены на рис. 3.

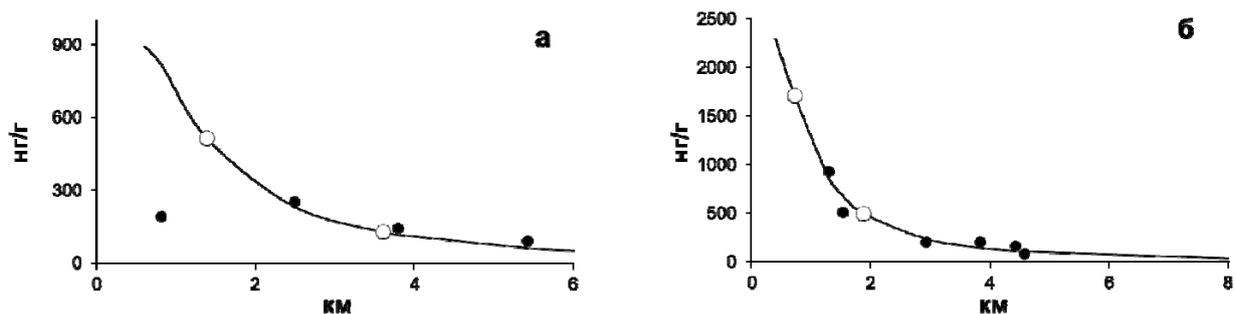


Рис. 3. Численно восстановленные концентрации ртути (нг / г) в северном (а) и северо-западном (б) направлении от основной зоны загрязнения почвы (очаг 1) на промплощадке НЗХК.

○, ● - опорные и контрольные точки измерений

### Обсуждение

Проведённое летом 2017 г. опробование листьев тополя является продолжением начатых в 2014 г. биогеохимических исследований ртутного загрязнения на территории г. Новосибирска [21]. Результаты предыдущих исследований позволили выбрать оптимальную пространственную сеть отбора проб листьев в окрестностях НЗХК. Наряду с идеей равномерного покрытия территорий города сетью точек наблюдений был реализован и маршрутный пробоотбор относительно основных очагов ртутного загрязнения промплощадки завода. Это по-

зволило более надёжно увязать предложенную модель оценивания с динамическими процессами эффективного подъёма и переноса пыли по направлениям. Максимальные концентрации обнаружены в точках северо-западного сектора, наиболее близко расположенных к основным очагам выноса. Повторяемость направлений ветра со стороны промплощадки в эти точки была сравнительно высокой. Процессам выноса пыли также способствовало сухое жаркое лето.

Весьма существенным моментом в построении адекватной модели оценивания явилось наличие опубликованных данных геохимического обследования территории промплощадки [12]. Оцениваемые параметры представляют агрегированные величины и включают в себя усреднённую интенсивность пыления, эффективную высоту подъёма, ряд метеорологических характеристик и т.д. В итоге это позволило существенно снизить неопределённости в описании поля концентрации по сравнению с известными методиками прямого моделирования [22].

### *Заключение*

Экспериментальными и численными исследованиями установлено, что северо-восточная часть г. Новосибирска в значительной степени загрязняется атмосферными выносами ртути и её соединений с промплощадки НЗХК. Основной вынос ртути произошёл в северо-западном секторе. Текущая интенсивность этого загрязнения зависела от состояния поверхностного слоя почвы на территории предприятия. Наибольшую опасность представляет сухая жаркая погода, что и наблюдалось в июне-июле 2017 г.

Предложена модель оценивания поля концентрации ртути в окрестностях пылящего площадного источника. Интенсивность пыления территории промплощадки НЗХК задавалась в соответствии с данными геохимического обследования и основными очагами загрязнения ртутью. Установлено вполне удовлетворительное согласие между данными измерений и результатами моделирования по направлениям выноса. Из полученных оценок параметров модели следует, что эффективная высота подъёма пыли могла достигать нескольких десятков метров. Для получения более полных представлений о процессах загрязнения необходимо проведение дальнейших комплексных исследований выявленной крупной техногенной аномалии ртути в северо-восточной части г. Новосибирска.

*Работа подготовлена при поддержке проекта РФФИ (грант № 17-47-540342), госзадания 0315-2016-0004, проекта ПРАН № 51 (0315-2018-0016).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минаматская конвенция о ртути / Текст и приложения. ООН, ЮНЕП, 2013. [www.mercuryconvention.org](http://www.mercuryconvention.org).

2. Tatsii Y. G., Udachin V. N., Aminov P. G. Environmental geochemistry of mercury in the area of emissions of the Karabashmed copper smelter // *Geochemistry international*. – 2017. – Vol. 55 (10). – С. 935–945.
3. Maillard F., Girardclos O., Assad M., Zappelini C., Pérez Mena J. M., Yung L., Guyeux C., Chrétien S., Bigham G., Cosio C., Chalot M. Dendrochemical assessment of mercury releases from a pond and dredged-sediment landfill impacted by a chlor-alkali plant // *Environmental Research*. – 2016. – Vol. 148. – С. 122–126.
4. Plyusnin V. M. Ecological safety of Siberia // *Contemporary problems of ecology*. – 2014. – Vol. 7 (6). – С. 597–603.
5. Ermakov V. V. Geochemical ecology and biogeochemical criteria for estimating the ecologic state of biospheric taxons // *Geochemistry international*. – 2015. – Vol. 53 (3). – С. 195–212.
6. Osipova N. A., Filimonenko K. A., Talovskaya A. V., Yazikov E. G. Geochemical approach to human health risk assessment of inhaled trace elements in the vicinity of industrial enterprises in Tomsk, Russia // *Human and Ecological Risk Assessment*. – 2015. – Т. 21. – № 6. – С. 1664–1685.
7. Mikhailova T. A., Kalugina O. V., Shergina O. V. Phytomonitoring of air pollution in the Baikal region // *Contemporary problems of ecology*. – 2013. – Vol. 6 (5). – С. 549–554.
8. Ufimtseva M. D. The patterns in accumulation of chemical elements by higher plants and their responses in biogeochemical provinces // *Geochemistry international*. – 2015. – Vol. 53 (5). – С. 441–455.
9. Горчаков Г. И., Копров Б. М., Шукуров К. А. Влияние ветра на вынос аэрозоля с подстилающей поверхности // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2004. – Т. 40. – № 6. – С. 759–775.
10. Simonenkov D. V., Raputa V. F., Yaroslavtseva T. V., Belan B. D., Antokhina O. Y. Maintaining data of route observations of emission plumes from Norilsk mining and metallurgical plant // *The International Society for Optical Engineering*. – 2017. – Vol. 10466, 104666M.
11. Годовой отчет ПАО «НЗХК» за 2015 год. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ncsr.ru/upload/iblock/df6/df6446697df97757a4050c7e-10158340.pdf>
12. Владимиров А. Г., Бабушкин А. В., Белозеров И. М., Островский Ю. В., Владимиров В. Г., Подлипский М. Ю., Минин В. А. Экогеохимия ртути и способы демеркуризации твердых ртутьсодержащих отходов в условиях Южной Сибири (на примере промплощадки ОАО Новосибирский завод химконцентратов) // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2012. – № 20. – С. 531–542.
13. Робертус Ю. В., Удачин В. Н., Рихванов Л. П., Кивацкая А. В., Любимов Р. В., Юсупов Д. В. Индикация компонентами природной среды трансграничного переноса загрязняющих веществ на территорию горного Алтая // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327.–№ 9. – С. 39–48.
14. Assad M., Parelle J., Cazaux D., Gimbert F., Chalot M., Tatin-Froux F. Mercury uptake into poplar leaves // *Chemosphere*. – 2016. – № 146. – С. 1–7.
15. Trace element Composition of poplar in Mongolian cities / Kosheleva N. E., Timofeev I. V., Kasimov N. S., Kiselyova T. M., Alekseenko A. V., Sorokina, O. I. // *Lecture Notes in Earth System Sciences*. – Springer International Publishing, 2016. – Issue 9783319249858. – С. 165–178.
16. Ташекова А. Ж., Горопов А. С. Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017.–Т. 328.–№ 5.–С. 114–124.
17. Юсупов Д. В., Рихванов Л. П., Барановская Н. В., Ялалтдинова А. Р. Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 25–36.

18. Lyapina E. E., Yusupov D. V., Tursunaliyeva E. M., Osipova V. V. Assessment of mercury content in poplar leaves of Novokuznetsk agglomeration // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 48 (1). – Issue 012022.
19. Ярославцева Т. В., Рапута В. Ф. Модели оценивания аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха от наземного площадного источника // Ползуновский вестник. – 2005. – № 4 (Ч. 2). – С. 125–130.
20. Lezhenin A. A., Raputa V. F., Yaroslavtseva T. V. Numerical analysis of atmospheric circulation and pollution transfer in the environs of Norilsk industrial region // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2016. – Vol. 29 (6). – С. 565–569.
21. Юсупов Д. В., Ляпина Е. Е., Турсуналиева Е. М., Осипова В. В. Ртуть в листьях тополя на территории Калининской промышленной зоны г. Новосибирска // Сибирский экологический форум «Эко-BOOM»: Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Экологические проблемы региона и пути их решения»: сб. материалов (Омск, 13–15 октября 2016 г.). – Омск: Литера, 2016. – С. 403–408.
22. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе // Утверждены приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273.

## REFERENCES

1. Minamata convention on mercury / Text and annexes. United Nations Environment Programme (2017). [www.mercuryconvention.org](http://www.mercuryconvention.org)
2. Tatsii, Y. G., Udachin, V. N., & Aminov, P. G. (2017). Environmental geochemistry of mercury in the area of emissions of the Karabashmed copper smelter. *Geochemistry international*, 55(10), 935–945.
3. Maillard, F., Girardclos, O., Assad, M., Zappellini, C., Pérez Mena, J. M., Yung, L., Guyeux, C., Chrétien, S., Bigham, G., Cosio, C., & Chalot, M. (2016). Dendrochemical assessment of mercury releases from a pond and dredged-sediment landfill impacted by a chlor-alkali plant. *Environmental Research*, 148, 122–126. doi: 10.1016/j.envres.2016.03.034.
4. Plyusnin, V. M. (2014). Ecological safety of Siberia. *Contemporary problems of ecology*, 7(6), 597–603.
5. Ermakov, V. V. (2015). Geochemical ecology and biogeochemical criteria for estimating the ecologic state of biospheric taxons. *Geochemistry international*, 53(3), 195–212.
6. Osipova, N. A., Filimonenko, K. A., Talovskaya, A. V., & Yazikov, E. G. (2015). Geochemical approach to human health risk assessment of inhaled trace elements in the vicinity of industrial enterprises in Tomsk, Russia. *Human and Ecological Risk Assessment*, 21(6), 1664–1685.
7. Mikhailova, T. A., Kalugina, O. V., & Shergina, O. V. (2013). Phytomonitoring of air pollution in the Baikal region. *Contemporary problems of ecology*, 6(5), 549–554.
8. Ufimtseva, M. D. (2015). The patterns in accumulation of chemical elements by higher plants and their responses in biogeochemical provinces. *Geochemistry international*, 53(5), 441–455.
9. Gorchakov, G. I., Koprov, B. M., & Shukurov, K. A. (2004). The effect of wind on aerosol removal from the underlying surface. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana [Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics]*, 40(6), 759–775 [in Russian].
10. Lezhenin, A. A., Raputa, V. F., & Yaroslavtseva, T. V. (2016). Numerical analysis of atmospheric circulation and pollution transfer in the environs of Norilsk industrial region. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 29(6), 565–569. doi: 10.1134/S1024856016060087.
11. Godovoj otchet PAO «NZHK» za 2015 god. [Annual report of PJSC «NCCP» for the year 2015]. <http://www.nccp.ru/upload/iblock/df6/df6446697df97757a4050c7e-10158340.pdf>
12. Robertus, Y. V., Udachin, V. N., Rikhvanov, L. P., Kivatskaya, A. V., Lyubimov, R. V., & Yusupov, D. V. (2016). Indication by environmental components the pollutant transboundary transfer to Gorny Altai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 327(9), 39–48 [in Russian].

13. Assad, M., Parelle, J., Cazaux, D., Gimbert, F., Chalot, M., & Tatin-Froux, F. (2016). Mercury uptake into poplar leaves. *Chemosphere*, 146. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.11.103.
14. Kosheleva, N. E., Timofeev, I. V., Kasimov, N. S., Kiselyova, T. M., Alekseenko, A. V., & Sorokina, O. I. (2016). Trace element Composition of poplar in Mongolain cities [Lecture Notes in Earth System Sciences, Issue 9783319249858]. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-24987-2\_14.
15. Tashekova, Ah. Zh., & Toropov, A. S. (2017). Application of leaves as biogeoindicators of urban environment state. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 328(5), 114–124 [in Russian].
16. Yusupov, D. V., Rikhvanov, L. P., Baranovskaya, N. V., & Yalaltdinova, A. R. (2016). Geochemical features of poplar leaf elemental composition in urban areas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 327(6), 25–36 [in Russian].
17. Lyapina, E. E., Yusupov, D. V., Tursunaliyeva, E. M., & Osipova, V. V. (2016). Assessment of mercury content in poplar leaves of Novokuznetsk agglomeration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 48(1), Vol. 012022. doi: 10.1088/1755-1315/48/1/012022.
18. Jaroslavceva, T. V., & Raputa, V. F. (2005). Models for estimating aerosol pollution of atmospheric air from a surface area source. *Polzunovskij vestnik*, 4(2), 125–130 [in Russian].
19. Vladimirov, A. G., Babushkin, A. V., Belozеров, I. M., Ostrovskij, Ju. V., Vladimirov, V. G., Podlipskij, M. Ju., & Minin, V. A. (2012). Ecogeochemistry of mercury and methods of demercurization of solid mercury-containing wastes in the conditions of Southern Siberia (on the example of the industrial site of the Novosibirsk Chemical Concentrates Plant). *Himija v interesah ustojchivogo razvitija [Chemistry for Sustainable Development]*, 20, 531–542 [in Russian].
20. Yusupov, D. V., Ljapina, E. E., Tursunaliyeva, E. M., & Osipova, V. V. (2016). Mercury in poplar leaves on the territory of the Kalinin industrial zone of Novosibirsk. In *Sbornik materialov Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Siberian Ecological Forum «Eco-BOOM»: Ecological problems of the region and ways to solve them]*. – Omsk: Litera, 403–408 [in Russian].
21. Simonenkov, D. V., Raputa, V. F., Yaroslavtseva, T. V., Belan, B. D., & Antokhina, O. Y. (2017). Maintaining data of route observations of emission plumes from Norilsk mining and metallurgical plant. *The International Society for Optical Engineering*, Vol. 10466, 104666M. doi: 10.1117/12.2288127.
22. *Metody raschetov rasseivaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmo-sfernom vozdukh (2017) [Methods of calculations of dispersion of the harmful (polluting) substances in atmospheric air]. Utverzhdeny prikazom Minprirody Rossii ot 06.06.2017 № 273 [in Russian].*

© В. Ф. Рапута, Д. В. Юсупов, Т. В. Ярославцева,  
Е. Е. Ляпина, Е. М. Турсуналиева, 2018

## **РАСЧЕТ НЕЙТРАЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ЭКМАНА С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ТРАНСПОРТНЫМ ЧЛЕНОМ УРАВНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОТОКА ЭНЕРГИИ**

*Людмила Ивановна Курбацкая*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: L.Kurbatskaya@ommgp.sccc.ru

*Альберт Феликсович Курбацкий*

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, главный научный сотрудник, e-mail: kurbat@itam.nsc.ru

Недавно развитая полностью явная алгебраическая модель напряжений Рейнольдса и вектора турбулентного потока тепла, термически стратифицированного планетарного атмосферного пограничного слоя, используется в отсутствие стратификации для расчета турбулентного течения Экмана над однородной шероховатой поверхностью для разных значений безразмерного поверхностного числа Россби. Используется модифицированная модель транспортного члена прогностического уравнения диссипации турбулентной кинетической энергии, зависящего от моментов третьего порядка. Вычисленные вертикальные профили средней скорости, турбулентных напряжений, турбулентной кинетической энергии, поверхностной скорости трения, высоты пограничного слоя удовлетворительно согласуются с данными наблюдений и полученными ранее LES-результатами.

**Ключевые слова:** прогностическое уравнение диссипации кинетической энергии турбулентности, модель транспортного члена, турбулентное нейтральное течение Экмана, численное моделирование

## **CALCULATION OF THE NEUTRAL TURBULENT EKMAN FLOW WITH THE MODIFIED TRANSPORT TERM IN THE PROGNOSTIC EQUATION OF THE SPECTRAL ENERGY FLUX**

*Lyudmila I. Kurbatskaya*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Researcher, phone: (383)330-61-52, e-mail: L.Kurbatskaya@ommgp.sccc.ru

*Albert F. Kurbatskiy*

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1, Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Chief Researcher, phone: (383)330-78-05, e-mail: kurbat@itam.nsc.ru

Recently developed the explicit algebraic model of Reynolds stresses and turbulent heat fluxes for the thermally stratified planetary atmospheric boundary layer is used for the calculation of the non-stratified turbulent Ekman flow over a homogeneous rough surface for different Rossby numbers. The modified model of the transport term of the prognostic equation for the turbulent kinetic energy dissipation, depending on the third moments, is used. The calculated vertical profiles of mean wind speed, turbulent stresses, turbulent kinetic energy, surface fric-

tion velocity, height of a boundary layer well comparison with data of observations and results received earlier LES-results.

**Key words:** neutral turbulent Ekman flow, explicit turbulence model, components wind velocity, corner turn wind, turbulent statistic, numerical modeling.

### *Введение*

Атмосферный пограничный слой (АПС) изменяется с течением времени и в пространстве. Его структура зависит от вращения Земли, горизонтального градиента давления и горизонтального градиента температуры (бароклинности), потоков тепла и влаги на поверхности, стратификации виртуальной потенциальной температуры, интенсивности турбулентности, наличия облачности, а также от шероховатости, наклона и неоднородности подстилающей поверхности.

Режим нейтрально стратифицированного планетарного пограничного слоя, возникающего при течении стационарного однородного потока воздуха с постоянной виртуальной потенциальной температурой над горизонтальной поверхностью с однородной шероховатостью при отсутствии потоков тепла и влаги на поверхности, горизонтальных градиентов температуры (бароклинности) и облачности. В нейтральном пограничном слое отсутствуют эффекты плавучести, возникающие из-за нагревания или охлаждения подстилающей поверхности. Традиционно нейтрально стратифицированный пограничный слой называется также турбулентным пограничным слоем Экмана. Хотя пограничный слой Экмана относительно редко наблюдается в натуральных условиях, понимание и количественное описание его турбулентной структуры важно, как для теории, так и для практических приложений. Знание структуры турбулентности необходимо для правильного построения турбулентных замыканий, использующихся в глобальных и мезомасштабных моделях атмосферной циркуляции.

В ранних вариантах теории пограничного слоя Экмана использовались различные предположения о зависимости коэффициента турбулентной вязкости от высоты. Гипотеза о том, что турбулентная вязкость не меняется с высотой, приводит к наиболее простой теории нейтрального атмосферного пограничного слоя – ламинарной теории Экмана. Однако такая теория далека от реальности: при расчетах получаются слишком большой поворот направления ветра с высотой, равный  $45^\circ$ , а также линейный профиль скорости вместо наблюдаемого логарифмического профиля в поверхностном подслое.

Целью настоящей работы является исследование структуры нейтрального атмосферного пограничного слоя с применением новой усовершенствованной явной алгебраической модели напряжений Рейнольдса. Подробное описание модели приведено в статье авторов [1]. В данной статье представлены расчеты для нейтрального пограничного слоя для разных значений поверхностного числа Россби.

## **Модификация транспортного члена в прогностическом уравнении диссипации турбулентной кинетической энергии**

Прогностические уравнения для турбулентной кинетической энергии ( $E$ ) и скорости диссипации ( $\varepsilon$ ) имеют вид [1]:

$$\frac{DE}{Dt} = -\overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_{m1}}{\sigma_E} \frac{\partial E}{\partial z} \right); \quad (1)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = -\frac{1}{2} \psi_0 \frac{\varepsilon^2}{E} + \frac{1}{2} \psi_1 \frac{\varepsilon}{E_k} P + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_{m1}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right), \quad (2)$$

где  $\overline{uw}$ ,  $\overline{vw}$  – турбулентные потоки импульса,  $U$ ,  $V$  – составляющие средней скорости ветра,  $P$  – порождение сдвигом,  $\sigma_E$  – число Шмидта для кинетической энергии турбулентности,  $\sigma_\varepsilon$  – турбулентное число Шмидта для диссипации,  $\psi_0 = 3,8$ ,  $\psi_1 = 2,4$ ,  $K_{m1}$  – вихревой коэффициент диффузии импульса.

Для транспортного члена в уравнении спектрального потока энергии турбулентности (2) обычно принимается допущение о диффузии по градиенту:

$$\frac{\partial}{\partial z} \overline{\varepsilon'w} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_m}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Глубоких физических оснований для такой параметризации нет. Нелокальный процесс турбулентной диффузии, описываемый моментами третьего порядка, параметризуется локальной моделью. Притягательная простота модели градиентной диффузии (3) для транспортного члена влечет за собой трудность нахождения величины турбулентного числа Шмидта  $\sigma_\varepsilon$  в минимизированной по сложности и полноте описания явной алгебраической модели напряжений Рейнольдса.

В нейтральном АПС согласно результатам LES расчета [2] в  $E$  – уравнении (1) порождение сдвигом и вязкая диссипация до высот  $\sim 0,3u_*/f$  на порядок величины больше чем транспортный член, выше транспортный член приобретает возрастающее значение ( $u_*$  – скорость трения на поверхности,  $f$  – параметр Кориолиса). Поскольку транспортный член в  $\varepsilon$  – уравнении играет роль источникового члена в локальных процессах, турбулентную диффузию диссипации следует увеличить (за счет уменьшения величины турбулентного числа Шмидта  $\sigma_\varepsilon$ ). Найти значение  $\sigma_\varepsilon$  можно путем сопоставления вычисленных характеристик пограничного слоя Экмана с результатами других RANS и LES расчетов (см. рис. 2). Численной оптимизацией найдено значение турбулентного числа Шмидта  $\sigma_\varepsilon = 0,65$ .

## *Результаты численного моделирования нейтрального турбулентного течения Экмана*

В настоящем численном тестировании начальный профиль ветра задается по всей высоте постоянным и равным геострофической скорости ветра  $G$ :  $U = G = 8$  м/сек,  $V = 0$ . Согласно существующей теории нейтрального ПСА, его структура определяется только одним безразмерным параметром – поверхностным числом Россби  $Ro = G / (f z_0)$ . В настоящем тесте численные расчеты проведены для значений шероховатости поверхности:  $z_0 = 0,01$  м (число Россби  $Ro = 8 \cdot 10^6$ ) и  $z_0 = 0,1$  м (число Россби  $Ro = 8 \cdot 10^5$ ).

Параметр Кориолиса  $f = 10^{-4} c^{-1}$ . Постоянная Кармана  $k = 0,4$ . Скорость трения может быть вычислена аналитически из логарифмического закона для средней скорости ветра

$$|\vec{U}|/u_* = k^{-1} \ln(z/z_0); \quad (4)$$

$$u_* = k \frac{\sqrt{U(z_2)^2 + V(z_2)^2}}{\ln(z_2/z_0)}. \quad (5)$$

Результаты вычисления некоторых характеристик нейтрального ПСА приведены на рис. 1–3.

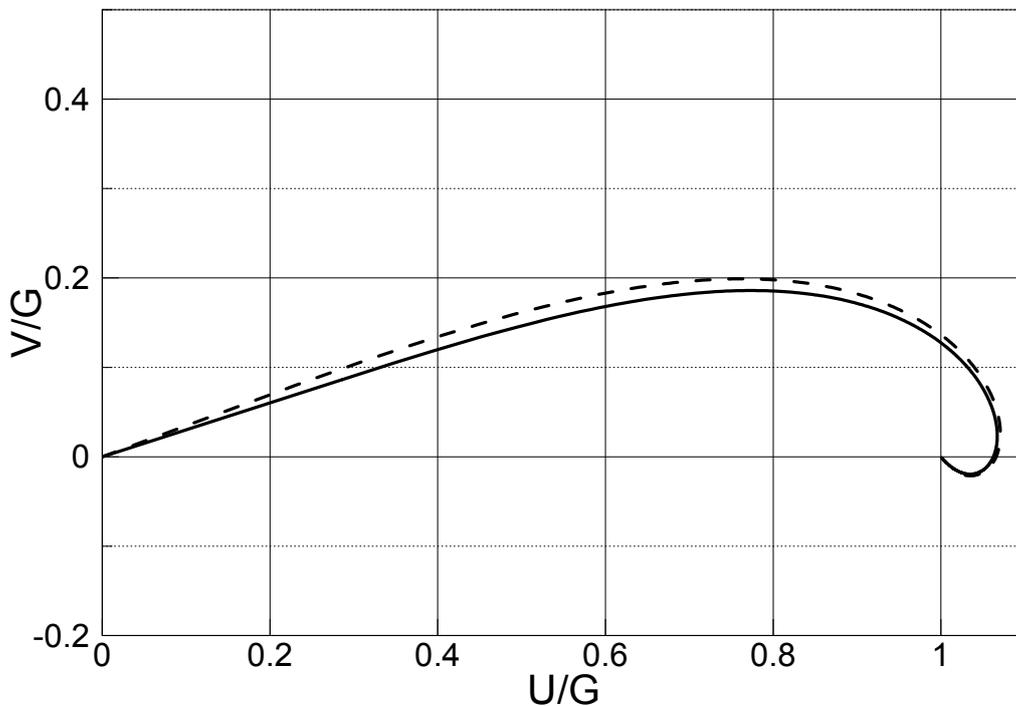


Рис. 1. Экмановская спираль средней скорости ветра

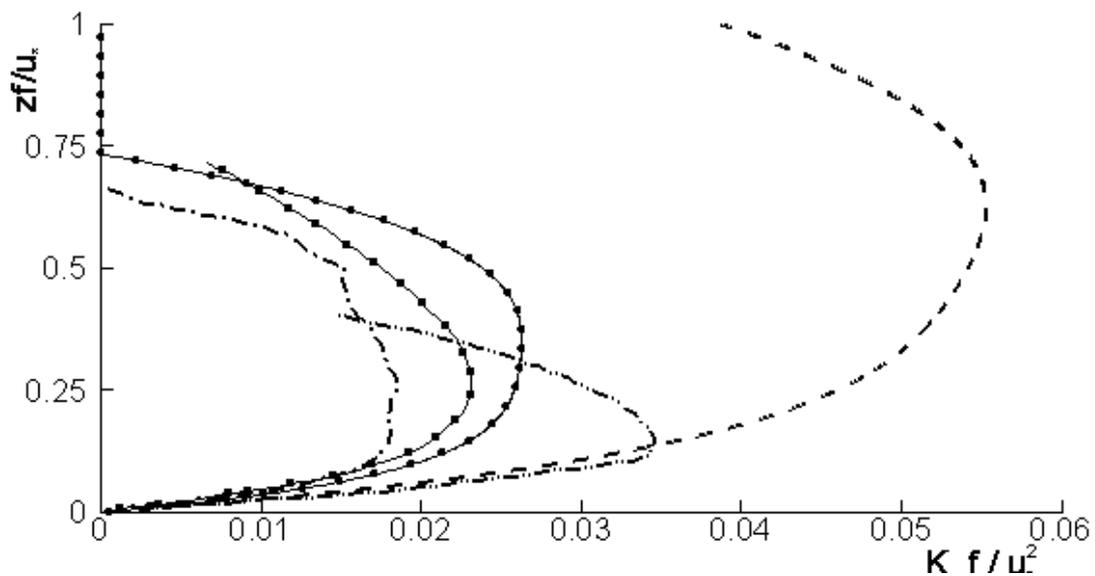


Рис. 2. Профили коэффициента вихревой диффузии импульса: сплошная кривая линия (•) –  $\sigma_\varepsilon = 0,65$ , штриховая линия –  $\sigma_\varepsilon = 1,18$ , штрихпунктирная линия (–•–) – LES расчет [4], сплошная кривая (■) – [6], штрихпунктирная линия (–••–) – лабораторный эксперимент [7]

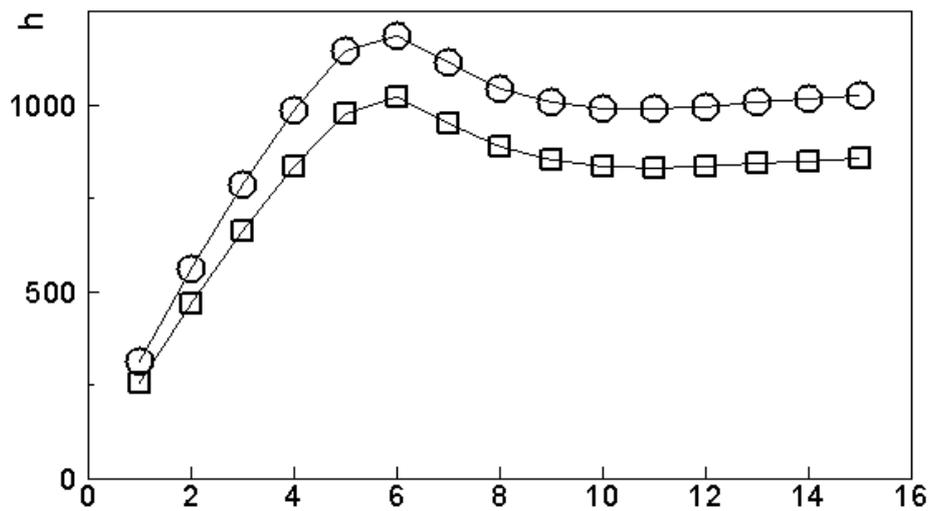


Рис. 3. Высота пограничного слоя  $h$  (м): кривая линия (○) –  $z_0 = 0,1$  м, кривая линия (□) –  $z_0 = 0,01$  м; по горизонтальной оси – время в часах

### Спираль Экмана

Рис. 1 показывает спираль Экмана для средней скорости ветра. Для числа Россби  $Ro = 8 \cdot 10^6$  и  $z_0 = 0,01$  м полный угол поворота ветра  $\alpha = 16^\circ$  (сплошная линия на рис. 1), а для числа Россби  $Ro = 8 \cdot 10^5$  и  $z_0 = 0,1$  м угол поворота ветра

$\alpha = 19^{\circ}$  (штриховая линия на рис. 1). Эти значения находятся в согласии с данными измерений [3] и расчетами по LES-методу [4]: величина угла поворота ветра среднего ветра уменьшается с увеличением числа Россби. Спираль ( $z_0 = 0,1$  м) располагается выше, чем спираль ( $z_0 = 0,01$  м). С увеличением числа Россби профиль спирали плотнее прижимается к поверхности.

На рис. 2 представлены вычисленные вертикальные профили безразмерного коэффициента вихревой диффузии импульса. Штриховая кривая с максимумом равным 0,055 вычислена со значением турбулентного числа Шмидта, численное значение которого близко к 'стандартно' используемому в стратифицированном атмосферном пограничном слое [5].

На рисунке 3 приведено поведение высоты пограничного слоя в зависимости от времени интегрирования. Видно, что после 6 часов интегрирования высота пограничного увеличивается до максимального значения, а затем уменьшается и выходит на стационарный режим. Видно, что высота пограничного слоя уменьшается с уменьшением шероховатости поверхности, как и при расчете LES-методом [4]. Уравнения модели интегрировались в течение 15 часов.

### **Заключение**

В данной работе выполнено численное моделирование нейтрально стратифицированного атмосферного пограничного слоя Экмана. Эта задача является классической задачей геофизической гидромеханики. Новизна работы заключена в использовании явной алгебраической модели для турбулентных потоков импульса, которая является предельным случаем полной явной модели для турбулентных потоков импульса и тепла для термически стратифицированного пограничного слоя атмосферы. Параметризация транспортного члена в prognostic уравнении диссипации турбулентной кинетической энергии моделью диффузии по градиенту потребовало модификации значения турбулентного числа Шмидта, чтобы вертикальное распределение вычисленного коэффициента вихревой диффузии импульса согласовывалось с данными вычислений и измерений других авторов. Настоящая модель пограничного слоя Экмана правильно воспроизводит основные характеристики в зависимости от величины числа Россби.

*Работа выполнена при поддержке темы госзадания ИВМиМГ СО РАН № 0315-2016-0004.*

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. А. Ф. Курбацкий, Л. И. Курбацкая. Явная алгебраическая модель турбулентности планетарного пограничного слоя: тестовый расчет нейтрально стратифицированного атмосферного пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 5. – С. 725–738.
2. Mason P. J., Thomson D. J. Large-eddy simulation of the neutral-static-stability planetary boundary layer // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. – 1987. – V. 113. – P. 413–443.

3. Зилитинкевич С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1970. – 292 с.
4. Шокуров М. В., Артамонов С. Ю., Эзау И. Н. Численное моделирование нейтрально стратифицированного атмосферного пограничного слоя // Морской гидрофизический журнал. – 2013. – № 2. – С. 37-50.
5. Lazeroms W. M. J., Svensson G., Bazile E., Brethouwer G., Wallin S., Johansson A. V. Study of Transitions in the Atmospheric Boundary Layer Using Explicit Algebraic Turbulence Models // Boundary-Layer Meteor. – 2016. – Vol. 161. – P. 19–47.
6. Wyngaard J. C., Cote O. R., Rao K. S. Modeling the atmospheric boundary layer. Turbulent Diffusion in Environmental Pollution (F. N. Frenkiel and R. E. Munn, Eds.). 1974. Vol. 18A. Academic Press. – P. 193–211.
7. Hinze J. Q. Turbulence. McGraw-Hill. 1975. 790 p.

## REFERENCES

1. A.F. Kurbatskii, L. I. Kurbatskaya. An explicit algebraic model of the planetary boundary layer turbulence: test computation of the neutrally stratified atmospheric boundary layer // Thermophysics and Aeromechanics. – 2017. – Vol. 24, No. 5. – P. 705–717.
2. Mason P. J., Thomson D. J. Large-eddy simulation of the neutral-static-stability planetary boundary layer // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1987. V. 113. P. 413–443.
3. Zilitinkevich S. Dinamika pograničnogo sloya atmosfery. L.: Gidrometeoizdat. 1970. – 292 с.
4. Shokurov M. V., Artamonov S. Yu., Ezau I. N. Chislennoe modelirovanie neytral'no stratifitsirovannogo atmosfernogo pograničnogo sloya // Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal. – 2013. – № 2. – P.37-50.
5. Lazeroms W. M. J., Svensson G., Bazile E., Brethouwer G., Wallin S., Johansson A. V. Study of Transitions in the Atmospheric Boundary Layer Using Explicit Algebraic Turbulence Models // Boundary-Layer Meteor. 2016. – Vol. 161. – P. 19–47.
6. Wyngaard J. C., Cote O. R., Rao K. S. Modeling the atmospheric boundary layer. Turbulent Diffusion in Environmental Pollution (F. N. Frenkiel and R. E. Munn, Eds.). 1974. Vol. 18A, Academic Press, 193–211.
7. Hinze J. Q. Turbulence. McGraw-Hill. 1975. 790 p.

© Л. И. Курбацкая, А. Ф. Курбацкий, 2018

## **АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ ПРОХОЖДЕНИЯ ВОДОКАМЕННОГО СЕЛЯ НА РЕКЕ КЫНГАРГА (БУРЯТИЯ) 2014 г.**

### ***Анна Александровна Добрынина***

Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128; Геологический институт СО РАН, 670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (950)120-02-70, e-mail: dobrynina@crust.irk.ru

### ***Владимир Васильевич Чечельницкий***

Байкальский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора, тел. (914)901-64-62, e-mail: chechel@crust.irk.ru

### ***Станислав Александрович Макаров***

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (983)241-21-36, e-mail: makarov@irigs.irk.ru

В настоящей работе представлены первые результаты сейсмических исследований прохождения катастрофического водокаменного селя, наблюдавшегося в период с 27 по 29 июня 2014 г. на реке Кынгарга в Тункинском районе (Республика Бурятия) по данным короткопериодной сейсмической станции «Аршан» (международный код ARS). Спектрально-поляризационный анализ сейсмограмм колебаний показал, что период селевой активности сопровождался резким изменением свойств микросейсмических колебаний в частотном диапазоне от 0.1 до 50 Гц. В спектре скоростей колебаний проявились две основные составляющие колебаний – высокочастотная, связанная с движением твердой фракции селевого потока и соударениями валунов о дно и борта русла реки Кынгарга, и низкочастотная, связанная с перемещениями водных масс по руслу реки. Зарегистрированные упругие колебания представляют собой поверхностные волны, поляризованные преимущественно в горизонтальной плоскости с выраженной северо-восточной ориентацией.

**Ключевые слова:** сель, опасные процессы, сейсмические волны, спектрально-поляризационный анализ, Аршан, Кынгарга, Восточный Саян.

## **ANALYSIS OF SEISMIC RECORDS OF TRANSMIT OF THE CATASTROPHIC WATER-STONE DEBRISFLOW ON THE KYNGARGA RIVER (REPUBLIC OF BURYATIA) 27-29 JUNE, 2014**

### ***Anna A. Dobrynina***

Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128, Lermontova St., Irkutsk, 664033, Russia; Geological Institute SB RAS, 6a, Sakh'yanovoy St., Ulan-Ude, 667047, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (950)120-02-70, e-mail: dobrynina@crust.irk.ru

### ***Vladimir V. Chechelnitzky***

Baikal Branch of the Federal Research Center of United Geophysical Survey RAS, 128, Lermontova St., Irkutsk, 664033, Russia, Ph. D., Vice-Director, phone: (914)901-64-62, e-mail: chechel@crust.irk.ru

*Stanislav A. Makarov*

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 1, Ulan-Batorskaya St., Irkutsk, 664033, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (983)241-21-36, e-mail: makarov@irigs.irk.ru

The first results of seismic studies of the transmit of the catastrophic water-stone debrisflow in June 27-29, 2014 on the river Kyngarga (Republic of Buryatia) are presented according to the short-period seismic station "Arshan". Spectral and polarization analysis of seismograms showed that the period of debrisflow activity was accompanied by a change in the properties of microseismic oscillations: the appearance of two components in the spectrum of vibrations - high-frequency, associated with the motion of the solid fraction of the debrisflow, and low-frequency, associated with the displacement of water masses. Registered elastic vibrations are surface waves polarized in a horizontal plane with a pronounced north-eastern orientation.

**Key words:** debrisflow, dangerous processes, seismic waves, spectral-polarization analysis, Arshan, Kyngyrga, East Sayan.

### *Введение*

Селевые потоки, как правило, возникают в бассейнах небольших горных рек во время интенсивного таяния снега или продолжительных ливневых дождей и могут быть крайне разрушительными явлениями [1–4]. При движении селевого потока по руслу вследствие турбулентности потоков и соударений камней и обломков горных пород о стенки и дно русла возникают упругие колебания, которые могут быть зарегистрированы расположенными поблизости сейсмическими станциями. В мире исследования селевых потоков, оползней и горных обвалов сейсмическими, акустическими и геофизическими методами проводятся достаточно давно [5–8], в настоящее время в селеопасных районах устанавливаются системы сейсмического мониторинга, позволяющие оценить энергию, длительность, объем селевого потока и другие его параметры [9–12 и другие]. В настоящей работе представлены результаты анализа уникальных сейсмических записей катастрофического водокаменного селя 27–29 июня 2014 г. на реке Кынгарга (Республика Бурятия), полученных на сейсмической станции «Аршан», находящейся в районе прохождения селевого потока [13].

### *Методы и материалы*

Река Кынгарга берет начало на южных склонах хр. Тункинские Гольцы (Восточный Саян) на высоте 2260 м и впадает в р. Тунка. Длина реки составляет 26 км, площадь водосбора – 231 км<sup>2</sup>, средний уклон – 59.5°. Согласно карте селевой опасности России [14], район Восточного Саяна, где был сформирован разрушительный селевой поток 2014 г., относится к областям с высокой селевой активностью.

В ночь с 27 на 28 июня 2014 г. в районе пос. Аршан Тункинского района Республики Бурятия в результате интенсивных ливневых осадков сформировались селевые потоки двух типов: 1) катастрофический водокаменный сель

по р. Кынгарга; 2) грязекаменные потоки по долинам, берущим начало в карах южного склона хребта Тункинские Гольцы (рис. 1) [15–18].

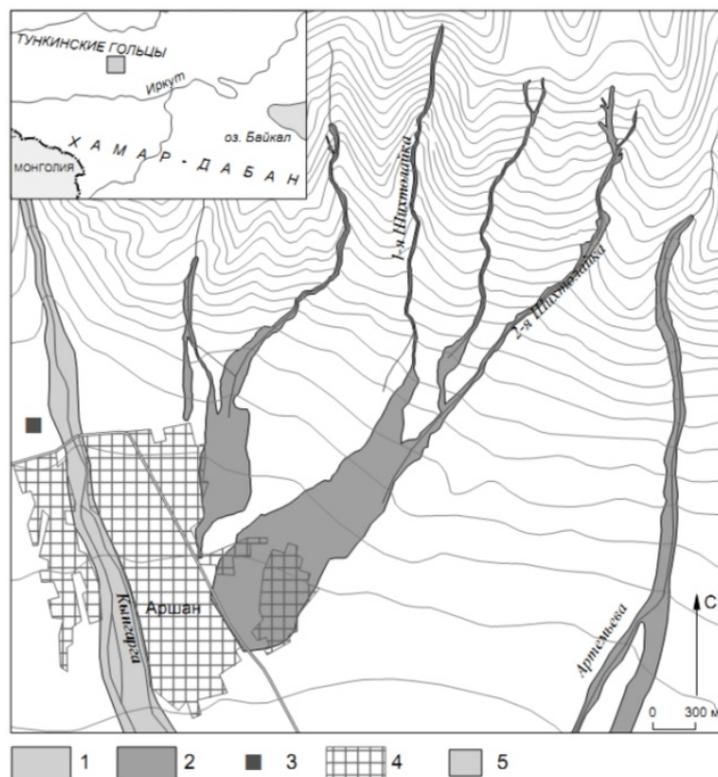


Рис. 1. Схема формирования селей в окрестностях пос. Аршан: зоны прохождения селей: 1 – водокаменного, 2 – грязекаменного; 3 – сейсмическая станция «Аршан»; 4 – границы пос. Аршан; 5 – район исследований (на врезке)

Гидрологический пост на р. Кынгарга был закрыт в 1987 г., поэтому при прохождении водокаменного селя в 2014 г. инструментальные наблюдения не проводились. Единственной достоверной фиксацией движения селевых масс могла быть только сейсмическая запись. Хотя в результате прохождения селевого потока была повреждена линия электропередач, поэтому сейсмическая станция «Аршан» работала с перебоями и полностью весь ход селевого потока записать не удалось, на сейсмограммах присутствуют записи сейсмических событий, которые могут быть интерпретированы как начало и окончание движение влекомых наносов (селевых масс) в водокаменном селе, ударов и пр.

Нами анализировались данные непрерывной сейсмической регистрации за период 26 июня – 29 июля 2014 года, полученные на сейсмической станции «Аршан», расположенной на окраине пос. Аршан ближе к Тункинским Гольцам на правом берегу р. Кынгарга (рис. 1) [19]. Координаты станции  $51.920^\circ$  с.ш. и  $102.421^\circ$  в.д., наименьшее расстояние от сейсмопавильона до русла реки составляет 250 м. Установленная на станции аппаратура имеет три короткопериодных сейсмометрических канала повышенной чувствительности, регистрирующие скорости смещения почвы (сейсмометры СМ-3).

## Результаты

Были исследованы как фоновые (микросейсмические) колебания, так и записи отдельных селевых событий. Чтобы установить нормальный режим фоновых колебаний на станции «Аршан», дополнительно были проанализированы микросейсмы за предыдущие годы (2004–2014 гг.). Для того, чтобы избежать влияния сезонных условий (промерзание грунтов в зимний период), анализировались записи летнего периода (июнь – июль). Согласно полученным данным, микросейсмические колебания в спокойной обстановке представлены, в основном, цугами низкочастотных сейсмических волн (пики наблюдаются на частотах 0.25, 2.00 и 6.00 Гц). Поляризационный анализ не показывает какого-либо доминирующего направления колебаний.

На записи 27 июня 2014 г. до 16 часов 25 минут микросейсмический фон также оставался спокойным (рис. 2).

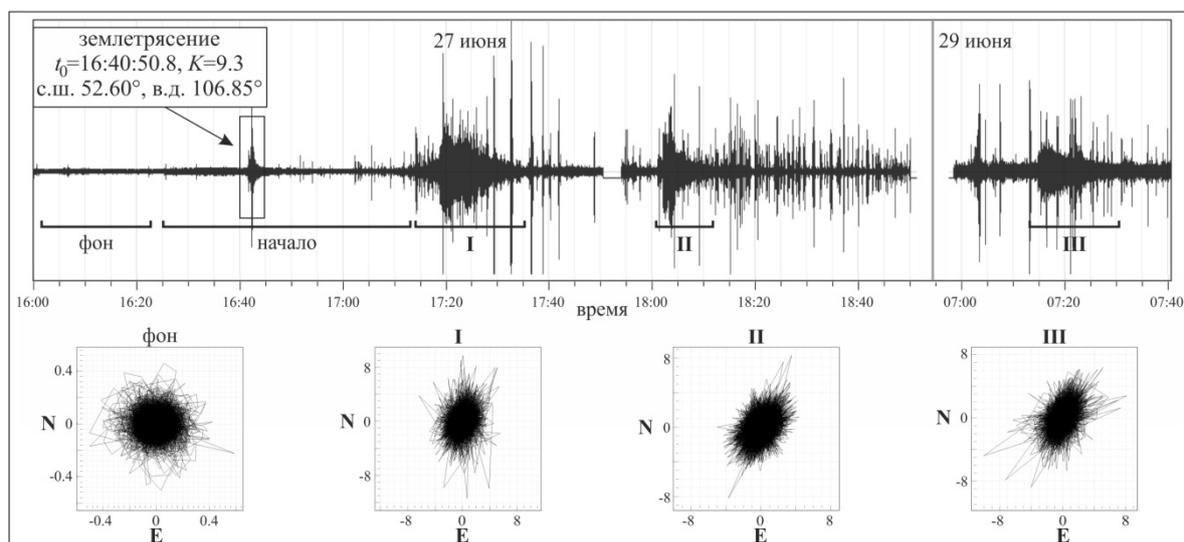


Рис. 2. Фрагменты сейсмограмм 27 и 29 июня 2014 г.:

скобками показаны участки фоновых колебаний, начала селевой активности и записи движения влекомых наносов (I, II и III). Для отдельных участков внизу показаны диаграммы поляризации колебаний в горизонтальной плоскости. Прямоугольником выделено региональное землетрясение в районе Южного Байкала

С указанного времени наблюдаются общее увеличение амплитуды микросейсмических колебаний. На фоне этих изменений в 16:41:36.7 зарегистрированы сейсмические волны от слабого землетрясения в районе Южного Байкала (энергетический класс  $KP=9.3$ , расстояние до станции «Аршан» 310 км, по данным БФ ФИЦ ЕГС РАН [8]). По причине его удаленности и малой энергии оно никак не связано с последующими событиями. После землетрясения на фоне микросейсмических колебаний отмечается несколько отдельных импульсных событий, со временем их количество и амплитуда возрастают, поляризационный анализ показывает преобладание северо-восточного направления колеба-

ний в горизонтальной плоскости. В 17 часов 18 минут зарегистрировано начало движения влекомых наносов по дну реки Кынгарга (см. участок I на рис. 2). Велосиграмма имеет форму вытянутой капли, максимум достигается за 37 секунд, потом идет постепенное понижение амплитуды сигнала. На фоне записи наблюдаются отдельные импульсные события высокой амплитуды. Спектрально-поляризационный анализ показывает преобладание в спектре сигнала высоких частот 24–44 Гц и выраженную северо-восточную ориентацию колебаний, вертикальная компонента колебаний выражена очень слабо (см. рис. 2). После интегрирования на сейсмограмме (записи смещений) преобладают низкочастотные колебания (0.3–0.5 Гц). Общая длина события до снижения уровня фона до уровня начала селевой активности оценивается в 12 минут 10 секунд.

Второе движение селевых масс по дну реки зарегистрировано в 18 часов 02 минуты (см. участок II на рис. 2), по длительности (~8 минут) и амплитуде он слабее первого. В спектре скоростей колебаний также преобладают высокочастотные колебания (21–45 Гц, максимум на 32–40 Гц), а низкочастотная составляющая (0.35–0.40 Гц) выражена более слабо. Поляризация колебаний в горизонтальной плоскости с север–северо-восточной ориентацией, слабо выражена вертикальная компонента колебаний (см. рис. 1). На хвосте записи наблюдается несколько импульсных событий. После этого уровень микросейсмических колебаний остается повышенным, колебания поляризованы в северо-восточном направлении. На общем фоне регистрируются многочисленные импульсные события разной длительности (см. рис. 2), что свидетельствует о безостановочном (с чередованием ускорений и замедлений) движении влекомых наносов.

28 июня регистрация сейсмических событий началась с 09 часов 45 минут. Общий уровень фона в несколько раз выше, чем 27 июня. В спектре скоростей колебаний преобладают средние и высокие частоты (общий пик от 2 до 20 Гц), слабый пик отмечается в диапазоне 0.15–0.60 Гц. Поляризационный анализ не показывает преобладающего направления колебаний. На этом фоне с 10 часов 25 минут до 13 часов 50 минут наблюдается серия из нескольких десятков отдельных импульсных событий со смешанной ориентацией движения частиц – от северо-западной до северо-восточной. По характеру сейсмограммы эту запись можно отнести к активности при окончании движения влекомых наносов: такие же серии импульсных событий наблюдались после селевых потоков 27 июня (см. участки записи после отрезков I и II на рис. 2).

После окончания серии импульсных событий микросейсмический фон остается спокойным, нет выраженной поляризации колебаний. 29 июня в 01 час начинается череда изменений спектрально-поляризационных характеристик фоновых колебаний: доля высокочастотной составляющей в спектре скоростей колебаний то усиливается, то ослабевает, поляризация колебаний меняется от северо-восточной до северо-западной, временами возвращаясь в нормальное состояние. Последнее движение влекомых наносов начинается в 07 часов 15 минут (см. участок III на рис. 2). Запись имеет форму узкой вытянутой капли, длительность ~12 минут. На фоне селя зарегистрировано несколько импульсных и продолжительных событий. После интегрирования в записи сме-

щений появляются низкочастотные колебания – в середине и в конце движения влекомых наносов. В отличие от обоих предыдущих событий в спектре последнего движения выражены умеренные частоты – от 2 до 7 Гц, низкочастотная составляющая выражена слабо. Максимум излучения наблюдается в диапазоне 24–44 Гц, пик – на 38–40 Гц. Для событий на фоне селя преобладают высокие частоты (25–40 Гц). Поляризационный анализ показывает стабильную северо-восточную ориентацию колебаний в горизонтальной плоскости как для самого движения влекомых наносов, так и для импульсных событий на его фоне. На стадии завершения движения селевых масс уровень фона сохранялся постоянным, также наблюдалась серия отдельных импульсных событий. Поляризация колебаний меняется от меридиональной до северо-восточной. Уровень микросейсмических колебаний на конец регистрации 29 июня (08 часов 47 минут) так и не вернулся к первоначальному значению, зарегистрированному 26 июня (до начала селевой активности).

### *Обсуждение*

Исходя из анализа сейсмических записей, можно заключить, что движение селевых масс, представленных валунно-галечниковыми отложениями, началось 27 июня в 17 часов 19 минут и продолжалось, то ослабевая, то усиливаясь, в течение почти трех суток. На велосиграммах зафиксировано три продолжительных сейсмических события длительностью 8–12 минут, которые могут быть интерпретированы как движение влекомых наносов в селевом потоке. Спектр этих событий представлен высокочастотными колебаниями (22–48 Гц), также значительный вклад вносит низкочастотная составляющая – 0.35–0.45 Гц. Те же низкочастотные колебания наблюдаются и для фона за весь период селевой активности. Такое разделение спектра скоростей колебаний на две составляющие может быть объяснено наложением двух процессов – поток водных масс с образованием турбулентных потоков (низкочастотная компонента с максимумом 0.4 Гц) и удары твердой фракции селевого потока о дно и стенки русла (высокочастотная компонента с максимумом излучения в диапазоне 30–44 Гц). В процессе движения влекомых наносов, а также до их начала и в конце отмечаются разнородные высокочастотные импульсные и достаточно продолжительные события (их длительность может варьироваться от 2 до 30 секунд), которые также представляют собой соударения и волочение камней и обломков горных пород в русле потока.

Поляризационный анализ сейсмических записей во время селевого потока (перемещение селевых масс, отдельные импульсные события и микросейсмический фон) показал преобладание северо-восточной или север-северо-восточной ориентации колебаний при слабой выраженности колебаний в вертикальной плоскости. Это свидетельствует о том, что зарегистрированные сейсмические волны являются поверхностными волнами (преимущественно, это волны Лява, и, в меньшей степени, волны Рэлея и поверхностные волны типа рэлеевских). Так как в волнах Лява движение частиц перпендикулярно направлению распро-

странения волны, то можно заключить, что источник возбуждения упругих колебаний находился на востоке – юго-востоке от сейсмической станции «Аршан». Это направление соответствует пространственному положению изучаемых селевых потоков (см. рис. 1).

### *Заключение*

Анализ прохождения селевого потока 27–29 июня 2014 г. на основе сейсмических записей стал возможным благодаря положению сейсмической станции непосредственно в районе прохождения селя. Однако, еще в 1973 году академиком И.Е. Гольпериным была высказана мысль о возможности создания региональной сети оповещения о селевой опасности, основанной на регистрации сейсмических колебаний [20]. Подобные мониторинговые сети в настоящее время действуют на территории многих селеопасных районов мира [9–12 и другие]. Установка локальных сетей сейсмических станций в селеопасных зонах на территории РФ в будущем даст возможность проводить детальные исследования процессов и характеристик селевых потоков, изучать соотношения между свойствами самих потоков и параметрами возбуждаемых ими сейсмических волн, а также позволит организовать систему раннего предупреждения о приближении селя.

### *Благодарности*

Авторы выражают благодарность Байкальскому филиалу Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» за предоставленные сейсмограммы станции «Аршан». Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области, проект 17-45-388088.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Coe J.A., Kinner D.A., Godt J.W. Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, central Colorado // *Geomorphology*. – 2008. – V. 96. – P. 270–297.
2. Fan R.L., Zhang L.M., Wang H.J., Fan X.M. Evolution of debris flow activities in Gaojiagou Ravine during 2008–2016 after the Wenchuan earthquake // *Engineering Geology*. – 2018. – V. 235. – P. 1–10.
3. McGuire L. A., Rengers F. K., Kean J. W., Staley D.M. Debris flow initiation by runoff in a recently burned basin: Is grain-by-grain sediment bulking or en masse failure to blame? // *Geophys. Res. Lett.* – 2017. – V. 44. – P. 7310–7319. doi:10.1002/2017GL074243.
4. Xie T., Wei F., Yang H., Gardner J.S., Xie X. A design method for a debris flow water-sediment separation structure // *Engineering Geology*. – 2017. – V. 220. P. 94–98. Doi:10.1016/j.enggeo.2017.01.025.
5. Ammosov S. M., Kalinina A. V., Volkov V. A. Using a Three-Component KMV Seismometer for Recording Microtremors in the Zone of a Landslide Slope // *Seismic Instruments*. – 2007. – V. 43. – P. 26–33.

6. Arattano M., Marchi L., Cavalli M. Analysis of debris-flow recordings in an instrumented basin: confirmations and new findings // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2012. – V. 12. – P. 679–686. doi:10.5194/nhess-12-679-2012.
7. Hibert C., Ekström G., Stark C. P. The relationship between bulk-mass momentum and short-period seismic radiation in catastrophic landslides // *J. Geophys. Res. Earth Surface.* – 2017. – V. 122. – P. 1201–1215. doi:10.1002/2016JF004027.
8. Huang X., Li Zh., Yu D., Xu Q., Fan J., Hao Zh., Niu Ya. Evolution of a giant debris flow in the transitional mountainous region between the Tibetan Plateau and the Qinling Mountain range, Western China: Constraints from broadband seismic records // *Journal of Asian Earth Sciences.* – 2017. – V. 148. – P. 181–191.
9. Besson B., Eiríksson G., Thórarinnsson O., Thórarinnsson A., Einarsson S. Automatic detection of avalanches and debris flows by seismic methods // *Journal of Glaciology.* – 2007. – V. 53(182). – P. 461–472.
10. Arattano M., Coviello V., Abancó C., Hürlimann M., McArdeall B.W. Methods of data processing for debris flow seismic warning // *International Journal of Erosion Control Engineering.* – 2016. – V. 9(3). – P. 114–121.
11. Schimmel A., Hubl J. Automatic detection of debris flows and debris floods based on a combination of infrasound and seismic signals // *Landslides.* – 2016. – V. 13(5). – P. 1181–1196. doi:10.1007/s10346-015-0640-z.
12. Walter F., Burtin A., McArdeall B., Hovius N., Weder B., Turowski J.M. Rapid Detection and Location of Debris Flow Initiation at Illgraben, Switzerland // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* – 2016. – V. 17(6). – P. 939–955. doi:10.5194/nhess-2016-321.
13. Чечельницкий В.В., Макаров С.А., Добрынина А.А. Прохождение катастрофического водокаменного селя на реке Кынгарга (республика Бурятия) 27–29 июня 2014 г. по сейсмическим данным // Доклады академии наук. – 2018. – В печати.
14. Perov V., Chernomorets S., Budarina O., Savernyuk E., Leontyeva T. Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events // *Natural Hazards.* – 2017. – V. 88. – P. 1–37.
15. Макаров С.А., Черкашина А.А., Атутова Ж.В., Бардаш А.В., Воропай Н.Н., Кичигина Н.В., Мутин Б.Ф., Осипова О.П., Ухова Н.Н. Катастрофические селевые потоки, произошедшие в поселке Аршан Тункинского района Республики Бурятия 28 июня 2014 г.: монография. – Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. – 2014. – 111 с.
16. Makarov S., Cherkashina A., Atutova Zh., Bardash A., Voropai N., Kichigina N., Mutin B., Osipova O., Ukhova N. Debris Flows of the Tunkinsky Goltsy Mountains (Tunkinsky District, Republic of Buryatia in Eastern Siberia) // *International Journal of Geohazards and Environment.* – 2016. – V. 2(3). – P. 166–179.
17. Laperdin V.K., Levi K.G., Lekhatiniv A.M., Kadetova A.V., Pellinen V.A., Rybchenko A.A. Causes and consequences of a catastrophic mudflows on 28 June 2014 near Arshan village in the Republic of Buryatia, Russia // *Geodynamics & Tectonophysics.* – 2014. – V. 5 (3). – P. 799–816. doi:10.5800/GT-2014-5-3-0156.
18. Kadetova A.V., Rybchenko A.A., Kozyreva E.A., Tie Y., Ni H. Debris flow event of 2014 and its impact on the accumulation of the solid fraction in the Kyngarga river channel, Tunka valley, southwestern Cisbaikalia, Russia // *Geodynamics & Tectonophysics.* – 2016. – V. 7(2). – P. 329–335. doi:10.5800/GT-2016-7-2-0210.
19. Масальский О.К., Гилёва Н.А., Хайдурова Е.В., Тубанов Ц.А. Прибайкалье и Забайкалье // *Землетрясения России в 2014 г.* – Обнинск: ГС РАН, 2016. – С.37–42.
20. Красюков В.А. Основные конструктивно-функциональные особенности датчиков систем оповещения о селевой опасности // *Селевые потоки.* – Сб. 2. – М.: Гидрометеиздат, 1977. – С. 64–66.

## REFERENCES

1. Fan, R.L., Zhang, L.M., Wang, H.J. & Fan, X.M. (2018). Evolution of debris flow activities in Gaojiagou Ravine during 2008–2016 after the Wenchuan earthquake. *Engineering Geology*, 235, 1–10.
2. Coe, J.A., Kinner, D.A. & Godt, J.W. (2008). Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, central Colorado. *Geomorphology*, 96, 270–297.
3. McGuire, L. A., Rengers, F. K., Kean, J. W. & Staley, D.M. (2017). Debris flow initiation by runoff in a recently burned basin: Is grain-by-grain sediment bulking or en masse failure to blame? *Geophys. Res. Lett.*, 44, 7310–7319. doi:10.1002/2017GL074243.
4. Xie, T., Wei, F., Yang, H., Gardner, J.S. & Xie, X. (2017). A design method for a debris flow water-sediment separation structure. *Engineering Geology*, 220, 94–98. doi:10.1016/j.enggeo.2017.01.025.
5. Ammosov, S. M., Kalinina, A. V. & Volkov, V. A. (2007). Using a Three-Component KMV Seismometer for Recording Microtremors in the Zone of a Landslide Slope. *Seismic Instruments*, 43, 26–33.
6. Arattano, M., Marchi, L. & Cavalli, M. (2012). Analysis of debris-flow recordings in an instrumented basin: confirmations and new findings. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 679–686. doi:10.5194/nhess-12-679-2012.
7. Hibert, C., Ekström, G. & Stark, C. P. (2017). The relationship between bulk-mass momentum and short-period seismic radiation in catastrophic landslides. *J. Geophys. Res. Earth Surface*, 122, 1201–1215. doi:10.1002/2016JF004027.
8. Huang, X., Li, Zh., Yu, D., Xu, Q., Fan, J., Hao, Zh. & Niu, Ya. (2017). Evolution of a giant debris flow in the transitional mountainous region between the Tibetan Plateau and the Qinling Mountain range, Western China: Constraints from broadband seismic records. *Journal of Asian Earth Sciences*, 148, 181–191.
9. Besson, B., Eiríksson, G., Thórarinnsson, O., Thórarinnsson, A. & Einarsson, S. (2007). Automatic detection of avalanches and debris flows by seismic methods. *Journal of Glaciology*, 53(182), 461–472.
10. Arattano, M., Coviello, V., Abancó, C., Hürlimann, M. & McArdell, B.W. (2016). Methods of data processing for debris flow seismic warning. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 9(3), 114–121.
11. Schimmel, A. & Hubl, J. (2016). Automatic detection of debris flows and debris floods based on a combination of infrasound and seismic signals. *Landslides*, 13(5), 1181–1196. doi:10.1007/s10346-015-0640-z.
12. Walter, F., Burtin, A., McArdell, B., Hovius, N., Weder, B. & Turowski, J.M. (2016). Rapid Detection and Location of Debris Flow Initiation at Illgraben, Switzerland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 17(6), 939–955. doi:10.5194/nhess-2016-321.
13. Chechelnitsky, V.V., Makarov, S.A. & Dobrynina, A.A. (2018). Transit of catastrophic water-stone debris flow on the river Kyngarga (Republic of Buryatia) on June 27-29, 2014 according to seismological data. *Doklady akademii nauk [Doklady Earth Sciences]*, in press [in Russian].
14. Perov, V., Chernomorets, S., Budarina, O., Savernyuk, E. & Leontyeva, T. (2017). Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events. *Natural Hazards*, 88, 1–37.
15. Makarov, S., Cherkashina, A., Atutova, Zh., Bardash, A., Voropai, N., Kichigina, N., Mutin, B., Osipova, O. & Ukhova, N. (2014). Catastrophic mudflows that occurred in the village of Arshan, Tunkinsky district of the Republic of Buryatia on June 28, 2014: monograph. Irkutsk: Izdatel'stvo Instituta geografii im. V.B. Sochavy SO RAN [Publishing house of the Institute of Geography of V.B. Sochava of the SB RAS] [in Russian].
16. Makarov, S., Cherkashina, A., Atutova, Zh., Bardash, A., Voropai, N., Kichigina, N., Mutin, B., Osipova, O. & Ukhova, N. (2016). Debris Flows of the Tunkinsky Goltsy Mountains

(Tunkinsky District, Republic of Buryatia in Eastern Siberia). *International Journal of Geohazards and Environment*, 2(3), 166–179.

17. Laperdin, V.K., Levi, K.G., Lekhatiniv, A.M., Kadetova, A.V., Pellinen, V.A. & Rybchenko, A.A. (2014). Causes and consequences of a catastrophic mudflows on 28 June 2014 near Arshan village in the Republic of Buryatia, Russia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(3), 799–816. doi:10.5800/GT-2014-5-3-0156.

18. Kadetova, A.V., Rybchenko, A.A., Kozyreva, E.A., Tie, Y. & Ni, H. (2016). Debris flow event of 2014 and its impact on the accumulation of the solid fraction in the Kyngarga river channel, Tunka valley, southwestern Cisbaikalia, Russia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 7(2), 329–335. doi:10.5800/GT-2016-7-2-0210.

19. Masalskiy, O.K., Gilyova, N.A., Khaidurova, E.V. & Tubanov, Ts.A. (2016). Baikal and Transbaikalia. Earthquakes in Russia in 2014. Obninsk: GS RAN, 37–42 [in Russian].

20. Krasukov, V.A. (1977). The main structural and functional features of sensors for warning systems for mudflow hazard. In *Selevye potoki: Sb. 2* [Debris flows, Vol. 2], (pp. 64–66). Moscow: Gidrometeoizdat [in Russian].

© *А. А. Добрынина, В. В. Чечельницкий, С. А. Макаров, 2018*

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН СКВОЗЬ ПРОНИЦАЕМЫЕ ПРЕПЯТСТВИЯ

*Гюльнара Маратовна Воскобойникова*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: gulya@opg.sscs.ru

*Марат Саматович Хайретдинов*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscs.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, профессор

В настоящей статье авторами выполнено математическое моделирование процессов распространения инфразвуковых акустических колебаний в нижней атмосфере при наличии растительного массива с учетом вносимой при этом силы трения. При этом из-за удаленности источника от растительности на расстоянии много большем длины акустической волны, волновой фронт ее принимается локально-плоским и анализ проводился в рамках 2D моделирования. Рассмотрена задача взаимодействия акустических волн, падающих под некоторым заданным углом на грунт, покрытый растительным слоем, и сейсмических волн, возникающих в грунте, в модели «воздух – растительный слой - грунт». Исследован вопрос о влиянии растительного массива на амплитуду акустических и сейсмических волн, возбуждаемых в грунте. В том числе оценено влияние коэффициента трения на скорость затухания акустических колебаний в растительной среде. Разработаны и реализованы алгоритм и программа расчета уровней акустического давления в разных средах с применением волнового уравнения для атмосферы, уравнений газовой динамики Эйлера для растительного покрова, уравнения упругости для грунта.

**Ключевые слова:** геоэкологические риски, прогнозирование, инфразвук, информативные факторы, уравнений газовой динамики, растительный слой.

## PROPAGATION OF ACOUSTIC WAVES THROUGH PERMEABLE OBSTACLES

*Gyulnara M. Voskoboynikova*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: gulya@opg.sscs.ru

*Marat S. Khairetdinov*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscs.ru; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Professor

In this article, the authors performed mathematical simulation of infrasound acoustic waves propagation in the lower atmosphere across a vegetation taking into account the frictional force. In this case, the analysis was carried out for the 2D model because a source was at a distance much greater than an acoustic wavelength and acoustic wave front is assumed to be locally flat. The prob-

lem of the interaction of acoustic wave falling at a given angle to the ground with a vegetation layer on the surface and seismic waves arising in the ground in the “air-vegetable layer-ground” model is considered. The question of the influence of the vegetable layer on amplitudes of acoustic and seismic waves excited in the ground is investigated. Including the influence of the friction coefficient on the rate of acoustic oscillations attenuation in a vegetable medium is estimated. The algorithm and a program for calculating acoustic pressure levels in different media using the wave equation for the atmosphere, Euler's gas dynamics equations for vegetable layer and the elasticity equation for the ground have been developed and implemented.

**Key words:** Geoecological risks, predication, infrasound, informative factors, gas dynamics equations, vegetable layer.

### *Введение*

Среди современных геоэкологических проблем важное место занимает проблема оценивания геоэкологических рисков для окружающей социальной и природной среды от воздействия мощных ударных акустических волн, порождаемых природно-техногенными событиями повышенной опасности, как например, мощными полигонными и карьерными взрывами, техногенными шумами автотрасс, вулканическими извержениями, землетрясениями и др. Наибольший интерес представляет изучение сейсмического и акустического воздействия от массовых взрывов, которые определяют целостность промышленных и жилых объектов [1, 2]. Наряду с метеофакторами, которые усиливают экологические риски от взрывов [5, 6], существуют факторы, приводящие к эффекту ослабления акустических колебаний от взрывов. К ним можно отнести наличие снежного покрова [7-10], лесных массивов, рельефа местности на пути распространения акустических волн [11-17]. Решение задачи распространения акустических колебаний в таких условиях носит многофакторный характер и решение ее в полной постановке является достаточно сложным. Ранее авторами рассматривались частные постановки задач распространения акустических колебаний, связанные с оцениванием влияния отдельных факторов на характеристики распространения.

В настоящей статье оцениваются характеристики ослабления, вызванные влиянием растительного массива на поверхностное распространение акустических колебаний, порождаемые инфранизкочастотными вибрационными источниками. Рассматривается задача взаимодействия акустических волн, падающих под некоторым заданным углом на грунт, покрытый растительным слоем, и сейсмических волн, возникающих в грунте, в модели «воздух – растительный слой - грунт». Исследуется вопрос о влиянии растительного массива на амплитуду акустических и сейсмических волн, возбуждаемых в грунте. Построена система дифференциальных уравнений газовой динамики, волновых и упругих уравнений с граничными условиями. Она описывает распространение падающих и отраженных акустических волн в воздухе, а также распространение преломленных и отраженных акустических волн в растительном слое и сейсмических волн в упругом грунте для трехслойной модели «воздух-растительный

слой-грунт». Амплитуды и давления отражения и преломления акустических и сейсмических волн вычисляются и анализируются в зависимости от высоты растительного слоя.

Теоретические и экспериментальные исследования распространения акустических волн в растительном массиве с точки зрения их экологически защитных свойств от вредных техногенных акустических возмущений являются актуальными, но малоизученными. В настоящее время существуют лишь отдельные модели взаимодействия акустического возмущения с лесными массивами. Имеющиеся теоретические модели рассматривают достаточно частные случаи распространения акустического возмущения через массив. При решении многих практических задач приходится иметь дело с исследованием процесса взаимодействия волновых акустических ударных фронтов с различными типами препятствий (жесткими, импедансными и проницаемыми) для различных конфигураций преград и различных параметров возмущения [18-20]. Все большую актуальность приобретают такие экологические задачи как проблема защиты от техногенного шума посредством высадки полос деревьев вдоль крупных автомагистралей и железных дорог [18]. Известно, что шум от автострады является низкочастотным источником. В последнее время для решения задач акустики активно используются методы газовой динамики. Использование данного подхода позволяет исследовать более подробные модели с учетом климатических условий и рельефа местности, а также изучать распространение возмущений большой интенсивности. За полноту моделей приходится платить большей вычислительной сложностью.

### *Постановка задачи*

Рассмотрим задачу падения акустической волны под заданным углом на упругое полупространство с растительным слоем на поверхности для случая дальнего распространения акустических волн от инфранизкочастотного источника. Для решения поставленной задачи рассматривается 3-слойная модель, состоящая из воздуха, растительного массива (леса) и грунта. Распространяющаяся в атмосфере акустическая волна падает на растительный слой под некоторым углом  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ ) к вертикали. В данной модели воздух занимает верхнее полупространство со скоростью звука  $c$  и плотностью  $\rho$ . Растительный массив представляет собой проницаемое препятствие и характеризуется коэффициентом трения  $\alpha$ , физический смысл которого связан с эффектом поглощения, которое создает проницаемое препятствие (растительный массив). Коэффициент трения  $\alpha$  зависит от коэффициента аэродинамического сопротивления  $c_d$  и удельной плотности поверхности растительности (листьев и ветвей)  $S$ . Грунт, занимающий нижнее полупространство, характеризуется плотностью  $\rho_g$ , скоростями продольных и поперечных волн  $V_p$  и  $V_s$ . Исследуется вопрос о том, насколько растительный массив поглощает акустические колебания и насколько уменьшается амплитуда акустической волны

в зависимости от свойств массива. При этом принимается условие об удаленности источника от массива на расстоянии много большем длины акустической волны, поэтому волновой фронт ее принимается локально-плоским и анализ проводится в рамках 2D моделирования.

Для воздуха решаются волновые уравнения с постоянной плотностью и скоростью звука. Волновые уравнения для давления в воздухе, а также связь скоростей и давлений имеет вид:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p = 0; \quad \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla p = 0, \quad (1)$$

где  $p$ ,  $\vec{u}=(u_x, u_z)$  и  $c$  – давление, вектор скорости перемещения воздушных частиц и скорость звука в воздухе. Решение уравнения (1) можно представить в виде гармонических волн. Тогда результирующее давление в воздухе будет представлено как сумма давлений падающей и отраженной волн:

$$P = P_0 e^{i\omega t - ik_x x - ik_z z} + P_1 e^{i\omega t - ik_x x - ik_z z}. \quad (2)$$

Здесь  $k_x, k_z$  – проекции волновых векторов по осям  $x$  и  $z$

Рассмотрим постановку двумерной задачи взаимодействия акустических волн с растительным массивом. Данная задача основана на системе уравнений Эйлера и может быть записана в покомпонентном виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0 \\ \frac{\partial u_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\alpha}{\rho} u_x \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\alpha}{\rho} u_z, \end{cases} \quad (3)$$

где  $u_x, u_z$  – компоненты вектора скорости перемещения воздушных частиц,  $\rho$  – плотность воздуха,  $c$  – скорость звука,  $\alpha$  – коэффициент трения в лесу. В результате приходим к выражению, зависящим только от давления  $p$ :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) + \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) можно представить также в виде суммы давлений преломленной и отраженной волн:

$$P = P_2 e^{i\omega t - ik_x x - ik_z z} + P_3 e^{i\omega t - ik_x x - ik_z z}. \quad (5)$$

Коэффициент трения  $\alpha$  зависит от коэффициента аэродинамического сопротивления  $c_d$  и удельной плотности поверхности растительности (листьев и ветвей)  $S$ .

В таблице приведены характеристики лесных массивов. Для реальных массивов характерно неравномерное распределение плотности поверхности растительности  $S$  по высоте.

Тип древостоя	Высота $H$ , м	$S$	$c_d$
Мелколиственный лес	10-30	1.2	0.02
Сосна	10-50	1.2	0.03
Кустарник	1-5	7	0.05

Граничными условиям на границе раздела «воздух – поверхность растительного массива» является равенство давлений и скоростей по компоненте  $z$  в обеих средах.

$$u_{z1}|_{z=0} = u_{z2}|_{z=0}, P_1|_{z=0} = P_2|_{z=0};$$

Акустическая преломленная волна, падающая на границу «растительный массив – грунт», учитывается в граничных условиях следующим образом: давление акустической волны с постоянной скоростью  $c$  и частотой  $\omega$  равно нормальному напряжению грунта. В итоге имеем следующие равенства:

$$\begin{aligned} \sigma_{xz\text{упр}}|_{z=h} &= 0, \sigma_{zz\text{упр}}|_{z=h} = p e^{i(\omega t - kx)} \\ u_{z\text{воздух}}|_{z=h} &= u_{z\text{упр}}|_{z=h} \end{aligned} \quad (6)$$

Для грунта решаются динамические уравнения упругости с постоянными характеристиками  $\lambda_{\text{упр}}, \mu_{\text{упр}}, \rho_{\text{упр}}$ :

$$(\lambda_{\text{упр}} + \mu_{\text{упр}}) \text{grad} \cdot \text{div} u_{\text{упр}} + \mu_{\text{упр}} \Delta u_{\text{упр}} - \rho_{\text{упр}} \cdot \frac{\partial^2 u_{\text{упр}}}{\partial t^2} = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) будем искать в виде потенциалов. Потенциалы  $\varphi$  и  $\psi$  связаны с полем смещения следующими формулами в общем виде:

$$u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x},$$

и предполагая их зависимость от  $x, z, t$  в виде

$$\varphi = A \exp i(\omega t - kx - k_{\varphi z} z), \quad \psi = B \exp i(\omega t - kx - k_{\psi z} z). \quad (8)$$

Подставляя в граничные условия (6) потенциалы  $\varphi$  и  $\psi$  из (8), получим неоднородную систему уравнений для коэффициентов  $A$  и  $B$  в общем виде:

$$\begin{aligned}\sigma_{xz}|_{z=0} &= \mu \left[ 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right]_{z=0} = 0, \\ \sigma_{zz}|_{z=0} &= \left[ \lambda \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + 2\mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right]_{z=0} = \rho \exp^{i(\omega t - kx)};\end{aligned}\tag{9}$$

Имея значение амплитуды давления падающей волны  $P_0$  необходимо определить коэффициенты  $P_1, P_2, P_3, A$  и  $B$ , которые отражают амплитуды давлений отраженных и преломленных волн.

### ***Результаты численного моделирования***

Разработаны и реализованы программы моделирования для расчета уровней акустического давления колебаний волн с помощью математической модели, основанной на уравнениях (2)–(9). Проведены тестовые расчеты для отладки разработанных программ. Представлены численные результаты моделирования акустических волновых полей для трехслойной модели «воздух-лес-грунт». Вычислены значения акустического давления для преломленной и отраженной волн в случае прохождения гармонической акустической волны через лесной массив в грунт с учетом коэффициента трения. Отмечено, что наблюдается эффект поглощения энергии акустической волны. В качестве примера на рис. 1 изображены графики акустического давления для преломленной и отраженной волн соответственно в зависимости от угла падения  $\theta$  в случае прохождения акустической волны через лес при различных высотах 0, 5, 10, 50 метров, частота  $f=10$  Гц. На рис.1 виден отмеченный выше эффект поглощения. При высоте 50 м и  $\theta=90^\circ$  амплитуда акустического давления может уменьшаться более чем на порядок.

На рис. 2 изображены графики акустического давления для преломленной и отраженной волн соответственно в зависимости от угла падения  $\theta$  при частотах  $f=8, 15, 80$  Гц. Как видно из рис. 2, при увеличении частоты на порядок скорость затухания акустического давления выше почти в 10 раз.

На скорость диссипации влияет наличие ветра. На рис.3 показаны графики затухания акустического давления в лесу при частоте 8 Гц. На рис. 3 видно, что при ветре, дующем по направлению от источника к лесу, акустическое давление больше, чем при ветре, дующем в противоположном направлении.

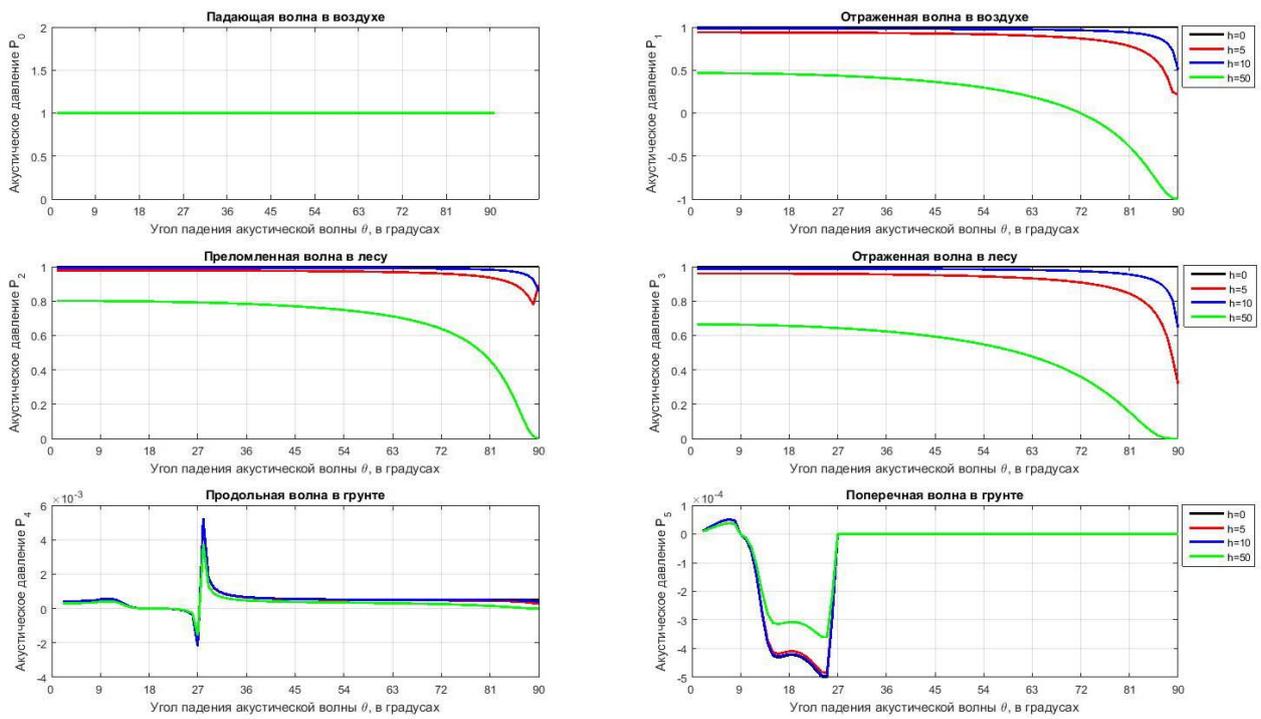


Рис. 1. Графики зависимости акустического давления для преломленной и отраженной волн от угла падения  $\theta$  при прохождении акустической волны через лес при различных высотах  $H = 0, 5, 10, 50$  метров, частота  $f = 10$  Гц

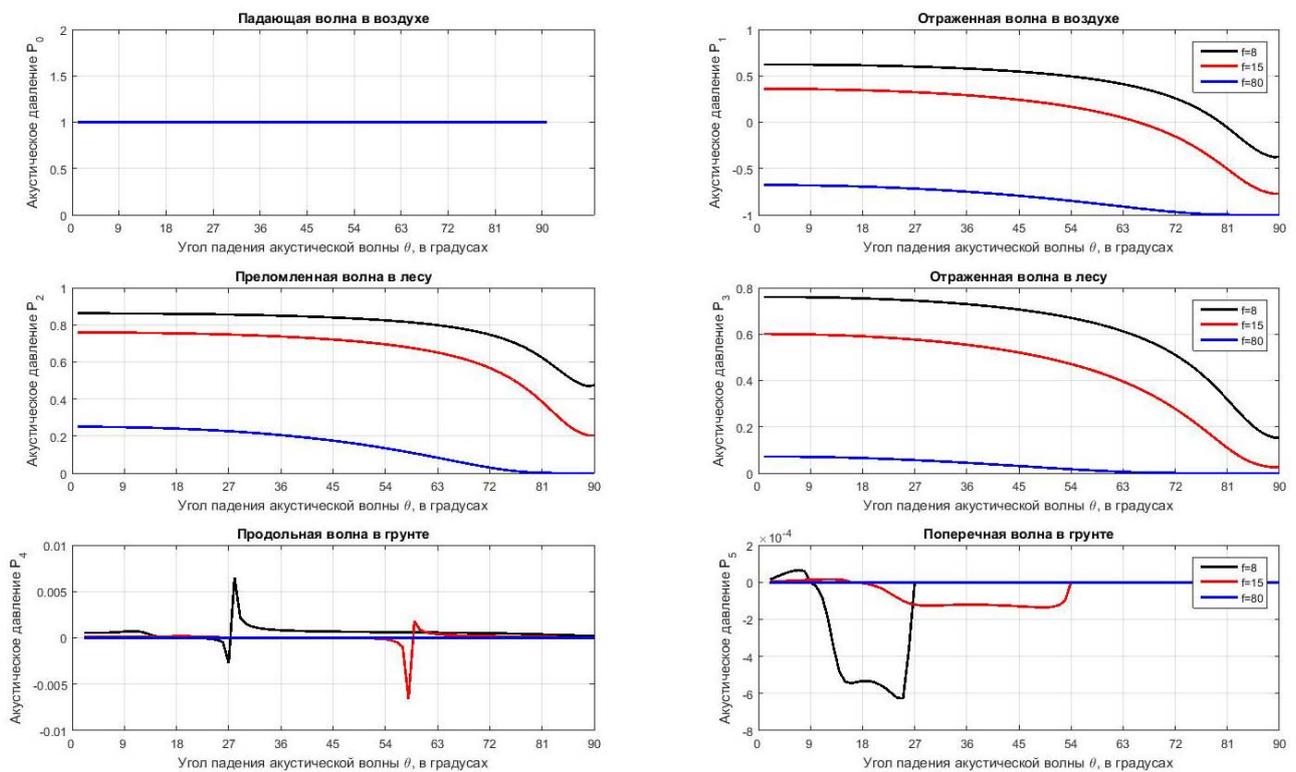


Рис. 2. Графики зависимости акустического давления для преломленной и отраженной волн от угла падения  $\theta$  при частотах  $f = 8, 15, 80$

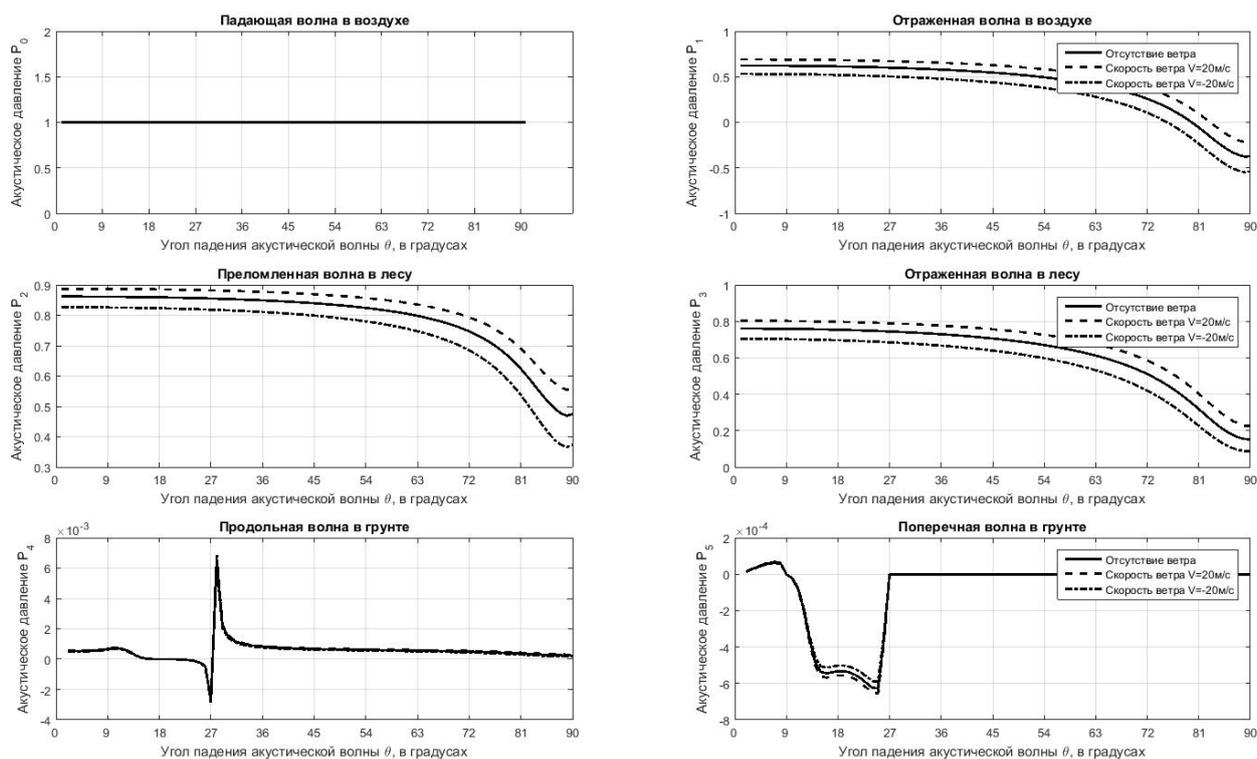


Рис. 3. Графики затухания акустического давления в растительном массиве при наличие ветра, частота  $f=8$  Гц. Сплошная линия – отсутствие ветра; штриховая – ветер по направлению от источника к лесу (20 м/с); штрихпунктирная – в противоположном направлении (-20 м/с)

### Заключение

Авторами статьи была рассмотрена задача падения акустической волны под заданным углом на упругое полупространство с растительным слоем на поверхности для случая дальнего распространения акустических волн от инфранизкочастотного источника. В связи с этим:

1. Выполнено математическое моделирование процессов распространения инфразвуковых акустических волн в атмосфере при наличии растительного массива с учетом вносимой при этом силы трения. Предполагалось, что на больших расстояниях от источника сферическое волновое поле локально плоское, что допускало 2D моделирование. Оценено влияние коэффициента трения на скорость затухания акустических колебаний в лесу.

2. Решена задача взаимодействия акустических волн, падающих под определенным углом на грунт с растительным слоем и сейсмических волн, возникающих в грунте в трехслойной модели «воздух-растительность-грунт». Для данной задачи анализировались условия и результаты решения задачи распространения акустических колебаний сквозь проницаемое препятствие в виде растительного массива.

3. Разработаны и реализованы алгоритм и программа расчета уровней акустического давления в разных средах с применением волнового уравнения для атмосферы, уравнений газовой динамики Эйлера для растительного покрова. В рамках созданной математической модели обоснован выбор начальных параметров и граничных условий и выполнены тестовые расчеты с помощью разработанных программ.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 16-07-01052, 17-07-00872).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gubarev V.V., Kovalevskii V.V., Khairtdinov M.S., Avrorov S. A., Voskoboinikova G. M., et al. Prediction of environmental risks from explosions based on a set of coupled geophysical fields. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2014. – Vol. 50. – No. 4. – P. 3–13.
2. Khairtdinov, M., Kovalevsky, V., Voskoboinikova, G., Sedukhina, G. Vibroseismoacoustic Method in Studying of Geophysical Fields Interaction in Ground Atmosphere // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference "Informatics, GeoInformatics and Remote Sensing" SGEM-2014, Bulgaria - Albena, Bulgaria. – 2014. – V.1. – P.925-931.
3. М.С. Хайретдинов, В.В. Ковалевский, Г.М. Воскобойникова, Г.Ф. Седухина. Оценка метеозависимых геоэкологических рисков от взрывов с помощью сейсмических вибраторов. // Технологии сейсморазведки. 2016 – № 3. – С. 132–138.
4. Multifactorial Prediction of Geoecological Risks from Powerful Explosions with Application the Vibroseismic method M.S. Khairtdinov, G.M. Voskoboinikova, V.V. Kovalevsky and G.F. Sedukhina // Proceedings of 12th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2017). Ulsan, S.Korea. – 2017. – P. 350-354.
5. Михайленко Б.Г., Михайлов А.А. Численное моделирование распространения сейсмических и акусто-гравитационных волн для модели «земля-атмосфера» при наличии ветра в атмосфере // Сибирский журн. выч. математики. – 2014. – Т.17. – № 2. – С.149-162.
6. Mikhailenko B.G., Mikhailov A.A. Numerical Modeling of Seismic And Acoustic-Gravity Waves Propagation In An "Earth-Atmosphere" Model In The Presence Of Wind In The Air // Numerical Analysis and Applications. – 2014. – Т. 7. – № 2. – С. 124-135.
7. Influence of Snow Cover on Seismic Waves Propagation Voskoboinikova G., Imomnazarov K., Mikhailov A., Tang, J.-G. Proceedings in AIP. Springer. – 2017. – V. 10187. – P. 697-703.
8. Voskoboinikova G., Shalamov K., Khairtdinov M., Kovalevsky V. Multifactor estimation of ecological risks using numerical simulation // AIP Conference Proceedings 1895, 120009 (2017).
9. Multifactorial Estimation of Geoecological Risks for Environment M.S. Khairtdinov, G.M. Voskoboinikova, Kh.Kh Imomnazarov and A.A. Mikhailov // Proceedings of 12th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2017). Ulsan S.Korea. – 2017. – P. 334-338.
10. Имомназаров Х.Х., Михайлов А.А. Применение спектрального метода для численного моделирования сейсмических волн в пористых средах при наличии диссипации энергии // СибЖВМ. – 2014. – Т. 17. – №2. – С. 139-147.
11. Aleksandr A. Mikhailov, Valery N. Martynov Numerical modeling of the infrasonic and seismic waves propagation in the "Earth-Atmosphere" model with a curvilinear interface // AIP Conference Proceedings 1907. – 2017. – P. 030036.
12. Харченко С.В. Влияние рельефа городской территории на формирование акустической обстановки: эксперимент и моделирование // Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология. – 2016. – № 3. – С. 26-34.

13. Харченко С.В. К вопросу о применении гармонического анализа при количественной характеристике рельефа // Геоморфология, из-во Наука (М.). – 2017. – № 2. – С. 14-24.
14. Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors / T. Van Renterghem [et al.] // Applied Acoustics. – 2015. – №92. – P. 86-101.
15. Болысов С.И., Харченко С.В. Городской рельеф как фактор комфортности проживания населения // журнал «Вестник Московского университета». Серия 5: География, Изд-во Моск. ун-та (М.). – 2016. – № 1. – С. 21-28.
16. Kharchenko S.V. City Location On the River Network Pattern and The Effect of Relief On the Distribution of Urban Buildings // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – том 7. – № 5. – С. 1543-1549.
17. Сенющенкова И. М. Акустические особенности распространения шума в пониженных формах рельефа местности // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2010. – № 5. – С. 91-99.
18. Ситник В.В. Моделирование влияния массива растительности на распространение акустических возмущений // Математическое моделирование. – 2007. – т.19. – №8. – С. 90-96.
19. Pierre Chobeau Modeling of Sound Propagation in Forests Using the Transmission Line Matrix Method. Study of multiple scattering and ground effects related to forests // Université du Maine, Le Mans, France. – 2014. – 147 P.
20. "The sound amplifying forest with emphasis on sounds from wind turbines" Elis Johansson // Department of Civil and Environmental Engineering. Division of Applied Acoustics. Chalmers University of Technology. Sweden. – 2010. – 97 P.

## REFERENCES

1. Gubarev, V.V., Kovalevskii, V.V., Khairtdinov, M.S., Avrorov, S. A., Voskoboinikova, G. M., et al. (2014). Prediction of environmental risks from explosions based on a set of coupled geophysical fields. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 50(4). 3–13.
2. Khairtdinov, M., Kovalevsky, V., Voskoboinikova, G., Sedukhina, G. (2014). Vibroseismoacoustic Method in Studying of Geophysical Fields Interaction in Ground Atmosphere. Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference "Informatics, GeoInformatics and Remote Sensing" SGEM-2014, Bulgaria - Albena, Bulgaria. 1. 925-931.
3. Khairtdinov, M.S., Kovalevskii, V.V., Voskoboinikova, G.M., Sedukhina, G.F. (2016). Otsenivanie meteo-zavisimyykh geoekologicheskikh riskov ot vzyryvov s pomoshch'yu seismicheskikh vibratorov [Estimation of meteo dependent geocological risks from explosions using seismic vibrators]. *Technologiya seismorazvedki [Technology of Seismic Survey]*, 3, 132-138. [in Russian]
4. M.S. Khairtdinov, G.M. Voskoboinikova, V.V. Kovalevsky and G.F. Sedukhina. (2017). Multifactorial Prediction of Geocological Risks from Powerful Explosions with Application the Vibroseismic method. Proceedings of 12th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2017). Ulsan, S.Korea. 350-354.
5. Mikhailenko, B.G., Mikhailov, A.A. (2014). Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya seismicheskikh i acusto-gravitatsionnykh voln dlya modeli "Zemlya-atmosfera" pri nalichii vetra v atmosphere [Numerical Modeling of Seismic and Acoustic-Gravity Waves Propagation In "Earth-Atmosphere" Model In The Presence Of Wind In The Atmosphere]. *Sibirskii zhurnal vych. matematiki. [Siberian Journal of Computational Mathematics]*. 17(2). 149-162. [in Russian]
6. Mikhailenko, B.G., Mikhailov, A.A. (2014). Numerical Modeling of Seismic And Acoustic-Gravity Waves Propagation In An "Earth-Atmosphere" Model In The Presence Of Wind In The Air. *Numerical Analysis and Applications*. 7(2). 124-135.
7. Voskoboinikova, G., Imomnazarov, K., Mikhailov, A., Tang, J.-G. (2017). Influence of Snow Cover on Seismic Waves Propagation. Proceedings in AIP. Springer, 10187. 697-703.
8. Voskoboinikova, G., Shalamov, K., Khairtdinov, M., Kovalevsky, V. (2017). Multifactor estimation of ecological risks using numerical simulation. AIP Conference Proc. 1895, 120009.

9. Khairetdinov, M., Voskoboynikova, G., Imomnazarov, K., Mikhailov A. (2017). Multifactorial Estimation of Geocological Risks for Environment M.S. Proceedings of 12th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2017). Ulsan, S. Korea, 334-338.
10. Imomnazarov, K.K., Mikhailov, A.A. (2014). Primenenie spectral'nogo metoda dlya chislennogo modelirovaniya seismicheskikh voln v poristyh sredah pri nalichii dissipatsii energii [Application of a spectral method for numerical simulation of seismic waves in the porous media in the presence of energy dissipation]. Sibirskii zhurnal vych. matematiki [Siberian Journal of Computational Mathematics], 17(2), 139-147. [in Russian]
11. Mikhailov, A.A., Martynov, V.N. (2017). Numerical modeling of the infrasonic and seismic waves propagation in the "Earth-Atmosphere" model with a curvilinear interface. AIP Conference Proceedings 1907, 030036.
12. Kharchenko, S.V. (2016). Vliyanie rel'efa gorodskoi territorii na formirovanie acusticheskoi obstanovki: eksperiment i modelirovanie [Influence of city relief to formation of acoustic situation: experiment and simulation]. Vestnik VSU, S.: Geography. Geocology, 3, 26-34. [in Russian]
13. Kharchenko, S.V. (2017). K voprosu o primenenii garmonicheskogo analiza pri kolichestvennoi harakteristiki rel'efa [To question about harmonic analysis application at quantitative characteristic of relief]. Geomorphology, Nauka (M.), 2, 14-24. [in Russian]
14. Renterghem, T. Van [et al.] (2015). Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors. Applied Acoustics, 92, 86-101.
15. Bolysov, C.I., Kharchenko, S.V. (2016). Gorodskoi rel'ef kak factor komfortnosti prozhivaniya naseleniya [City relief as factor of the comfort the habitation of population]. Vestnik MSU. S: Geography, (M.), 1, 21-28. [in Russian]
16. Kharchenko, S.V. (2016). City Location On the River Network Pattern and The Effect of Relief On the Distribution of Urban Buildings. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 7(5), 1543-1549.
17. Senjushchenkova, I.M. (2010). Akusticheskie osobennosti rasprostraneniya shuma v ponizhennykh formah rel'efa mestnosti [Acoustic features of noise propagation in lowered forms of relief]. Izvestia VUZov. Stroitel'stvo. [Universities News. Constructing], 5, 91-99. [in Russian]
18. Sytnik, V.V. (2007). Modelirovanie vliyaniya massiva rastitel'nosti na rasprostranenie akusticheskikh vozmushchenii [Simulation of the influence the vegetable massif to acoustic oscillation propagation]. Matematicheskoe modelirovanie [Mathematical modeling], 19(8), 90-96. [in Russian]
19. Chobeau, Pierre (2014). Modeling of Sound Propagation in Forests Using the Transmission Line Matrix Method. Study of multiple scattering and ground effects related to forests. Université du Maine, Le Mans, France.
20. Johansson, Elis (2010). The sound amplifying forest with emphasis on sounds from wind turbines. Department of Civil and Environmental Engineering. Division of Applied Acoustics. Chalmers University of Technology. Sweden.

© Г. М. Воскобойникова, М. С. Хайретдинов, 2018

## **ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОДНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОПОРОУПРУГОСТИ**

***Шерзад Холматжонович Имомназаров***

Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 6, аспирант, тел. (383)330-27-91, e-mail: shirz999@mail.ru

***Александр Анатольевич Михайлов***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-83-52, e-mail: alex\_mikh@omzg.ssc.ru

***Виталий Николаевич Доровский***

Baker Hughes Inc., Новосибирский Технологический Центр, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, доктор физико-математических наук, технический советник, тел. (383)332-94-43, e-mail: Vitaly.Dorovsky@BakerHughes.com

Численно исследуется одномерная нестационарная задача электромагнитоупругости пористых насыщенных сред при импульсном воздействии электромагнитным квазистационарным полем. Проиллюстрирована применимость спектрального метода Лагерра к одномерной динамической задаче импульсного воздействия, описываемого уравнениями электромагнитоакустики. Численно установлены особенности акустического отклика на импульсное электромагнитное воздействие: найдена связь амплитуд «поперечных» акустических волн, пришедших на внутреннюю сторону обсадной колонны от параметров, характеризующих среду и внешнее электромагнитное воздействие. Полученные результаты создают основу для разработки технологических методов измерения электроакустического параметра и электропроводности среды, расположенной за обсадной колонной.

**Ключевые слова:** магнитозвуковые колебания, электрокинетические параметры, коэффициент трения, пористая насыщенная среда, преобразование Лагерра.

## **NUMERICAL SOLUTION OF ONE DYNAMIC MAGNETOPOROELASTICITY PROBLEM**

***Sherzad Kh. Imomnazarov***

Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, 6, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, phone: (383)330-27-91, e-mail: shirz999@mail.ru

***Aleksander A. Mikhailov***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-83-52, e-mail: alex\_mikh@omzg.ssc.ru

***Vitaly N. Dorovsky***

Baker Hughes Inc., Novosibirsk Technology Center, 4a, Kutateladze St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Technical Advisor, phone: (383)332-94-43, e-mail: Vitaly.Dorovsky@BakerHughes.com

This paper numerically studies the one-dimensional non-stationary problem of the electromagnetoelasticity of porous saturated media for a pulsed electromagnetic quasi-stationary

field. The applicability of the Laguerre spectral method to the one-dimensional dynamic impulse action problem described by the electromagnetoacoustics equations is illustrated. The acoustic response to the pulsed electromagnetic effect is numerically determined: there is found a correlation between the amplitudes of "transverse" acoustic waves that have come to the inner side of the casing from the parameters characterizing the medium and the external electromagnetic effect. The obtained results form the basis for the development of technological methods for measuring the electroacoustic parameter and the electrical conductivity of the medium located behind the casing.

**Key words:** magnetoacoustic oscillation, electrokinetic parameters, friction coefficient, saturated porous media, Laguerre transform.

### *Введение*

Электропроводность насыщенной формации представляет только часть свойств горной породы. Акустические методы, например, в скважинных схемах с использованием волн Стоунли позволяют измерять проницаемость формации [1-13]. Индукционные методы электроразведки в скважинных условиях преимущественно направлены на измерение омической проводимости среды. Особого внимания заслуживают еще два кинетических параметра пористой среды, насыщенной электролитом: коэффициент межкомпонентного трения и электрокинетическая постоянная. С коэффициентом трения связывают проницаемость среды, а с электрокинетической постоянной –  $\zeta$ -потенциал [14]. В работах [14, 15], в частотном представлении в рамках электромагнитоакустики, предложена технологическая схема измерения электропроводности и проницаемости насыщенной электролитом формации для плоской и цилиндрической геометрии.

В данной работе геометрическая постановка, предложенной в [15] задачи, сохраняется. Дополнительно предполагается в скважине присутствие обсадной колонны, вне которой создается импульсное квазистационарное переменное магнитное поле, протекающим импульсным электрическим током. Вдоль скважины система рассматривается однородной. Исследуется акустический отклик системы. Для простоты анализа рассматриваемой задачи предполагается, что в акустическом отношении обсадная колонна является продолжением формации с точки зрения прохождения поперечных акустических колебаний. Поднимается вопрос о возможности измерения электропроводности, электроакустической константы и проницаемости по амплитудам поперечных акустических колебаний, пришедших в виде отклика на электромагнитное воздействие на внутреннюю сторону обсадной колонны.

### *Постановка задачи*

В цилиндрических координатах  $(r, \varphi, z)$  для полупространства  $(R_1, \infty)$  скорости матрицы  $\mathbf{u} = (0, u_\varphi, u_z)$  и насыщающей жидкости  $\mathbf{v} = (0, v_\varphi, v_z)$ , магнитное поле  $\mathbf{B} = (0, B_\varphi, B_z)$  удовлетворяют следующей начально-краевой задачи

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial t^2} &= c_t^2 \frac{\partial}{\partial r} L u_\varphi - \varepsilon \bar{\omega} (\dot{u}_\varphi - \dot{v}_\varphi) + \frac{\alpha \varepsilon c_e}{4\pi\sigma} \frac{\partial \dot{B}_z}{\partial r}, & \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= c_t^2 L \frac{\partial u_z}{\partial r} - \varepsilon \bar{\omega} (\dot{u}_z - \dot{v}_z) - \frac{\alpha \varepsilon c_e}{4\pi\sigma} L \dot{B}_\varphi, \\
\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} &= \bar{\omega} (u_\varphi - v_\varphi) + \frac{B_0 L B_\varphi}{4\pi\rho_l r} - \frac{\alpha c_e}{4\pi\sigma} \frac{\partial B_z}{\partial r}, \\
\frac{\partial B_\varphi}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{c_e^2}{4\pi\sigma} L B_\varphi - \frac{\alpha c_e \rho_l}{\sigma} (u_z - v_z) + v_\varphi \frac{B_0}{r} \right), \\
\frac{\partial v_z}{\partial t} &= \bar{\omega} (u_z - v_z) + \frac{B_0}{4\pi\rho_l r} \frac{\partial B_z}{\partial r} + \frac{\alpha c_e}{4\pi\sigma} L B_\varphi, \\
\frac{\partial B_z}{\partial t} &= L \left( \frac{c_e^2}{4\pi\sigma} \frac{\partial B_z}{\partial r} + \frac{\alpha c_e \rho_l}{\sigma} (u_\varphi - v_\varphi) + v_z \frac{B_0}{r} \right)
\end{aligned}$$

с нулевыми данными Коши и граница  $r = R_1$  свободная от напряжений и магнитного поля:

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{u_\varphi}{r} = 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial r} = 0, \quad B_\varphi = 0, \quad B_z = B_{z0}(t),$$

где  $\rho = \rho_l + \rho_s$ ;  $\rho_s, \rho_l$  - парциальные плотности матрицы и жидкости;  $\mathbf{v}, \mathbf{u}$  - скорости жидкости и матрицы;  $\mathbf{B}$  - магнитная индукция;  $\sigma$  - электропроводность;  $\chi^\circ$  - коэффициент трения;  $\alpha$  - электроакустический параметр;  $\bar{\chi} = \chi^\circ - \alpha^2 / \sigma$ ,  $c_t$  - скорость звука;  $c_e$  - скорость света; Постоянное магнитное поле  $\mathbf{B}_0 = (B_0/r, 0, 0)$  направлено вдоль оси  $Or$ ;  $\bar{\omega} = \chi^\circ \rho_l$ .

Для решения поставленной задачи применим интегральное преобразование Лагерра по времени  $\vec{W}_m(x_1, x_2) = \int_0^\infty \vec{W}(x_1, x_2, t) (ht)^{-\frac{\alpha}{2}} l_m^\alpha(ht) d(ht)$ , с формулами обращения  $\vec{W}(x_1, x_2, t) = (ht)^{\frac{\alpha}{2}} \sum_{m=0}^\infty \frac{m!}{(m+\alpha)!} \vec{W}_m(x_1, x_2) l_m^\alpha(ht)$ , где  $l_m^\alpha(ht)$  - функции Лагерра.

В результате данного преобразования исходная задача сводится к краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений в спектральной области [16-20]

$$\begin{aligned}
\frac{h^2}{4} u_\varphi^m - c_t^2 \frac{d}{dr} L u_\varphi^m + \varepsilon \bar{\omega} \frac{h}{2} (u_\varphi^m - v_\varphi^m) - \frac{\varepsilon \alpha c_e}{4\pi\sigma} \frac{h}{2} \frac{dB_z^m}{dr} &= f_1^m, \\
f_1^m &= -h^2 \sum_{n=0}^{m-1} (m-n) u_\varphi^n - h \varepsilon \bar{\omega} \sum_{n=0}^{m-1} (u_\varphi^n - v_\varphi^n) + \frac{h \varepsilon \alpha c_e}{4\pi\sigma} \sum_{n=0}^{m-1} \frac{dB_z^n}{dr},
\end{aligned}$$

$$\frac{h^2}{4} u_z^m - c_i^2 L \frac{du^m}{dr} + \varepsilon \bar{\omega} \frac{h}{2} (u_z^m - v_z^m) + \frac{\varepsilon \alpha c_e}{4\pi\sigma} \frac{h}{2} L B_\varphi^m = f_2^m,$$

$$f_2^m = -h^2 \sum_{n=0}^{m-1} (m-n) u_z^n - h \varepsilon \bar{\omega} \sum_{n=0}^{m-1} (u_z^n - v_z^n) - \frac{h \varepsilon \alpha c_e}{4\pi\sigma} \sum_{n=0}^{m-1} L B_\varphi^n,$$

$$\frac{h}{2} v_\varphi^m - \bar{\omega} (u_\varphi^m - v_\varphi^m) - \frac{B_0}{4\pi\sigma r} L B_\varphi^m + \frac{\alpha c_e}{4\pi\sigma} \frac{dB_z^m}{dr} = -h \sum_{n=0}^{m-1} v_\varphi^n,$$

$$\frac{h}{2} v_z^m - \bar{\omega} (u_z^m - v_z^m) - \frac{B_0}{4\pi\rho_l r} \frac{dB_z^m}{dr} - \frac{\alpha c_e}{4\pi\sigma} L B_\varphi^m = -h \sum_{n=0}^{m-1} v_z^n,$$

$$\frac{h}{2} B_\varphi^m - \frac{d}{dr} \left( \frac{c_e^2}{4\pi\sigma} L B_\varphi^m - \frac{\alpha c_e \rho_l}{\sigma} (u_z^m - v_z^m) + v_\varphi^m \frac{B_0}{r} \right) = -h \sum_{n=0}^{m-1} B_\varphi^n,$$

$$\frac{h}{2} B_z^m - L \left( \frac{c_e^2}{4\pi\sigma} \frac{dB_z^m}{dr} + \frac{\alpha c_e \rho_l}{\sigma} (u_\varphi^m - v_\varphi^m) + v_z^m \frac{B_0}{r} \right) = -h \sum_{n=0}^{m-1} B_z^n.$$

Решение задачи реализовано с помощью конечно-разностного метода со вторым порядком аппроксимации [19]. На рис. 1 представлен график функции  $u_\varphi$  (слева) и  $\dot{u}_z$  (справа), как функции времени на границе скважины.

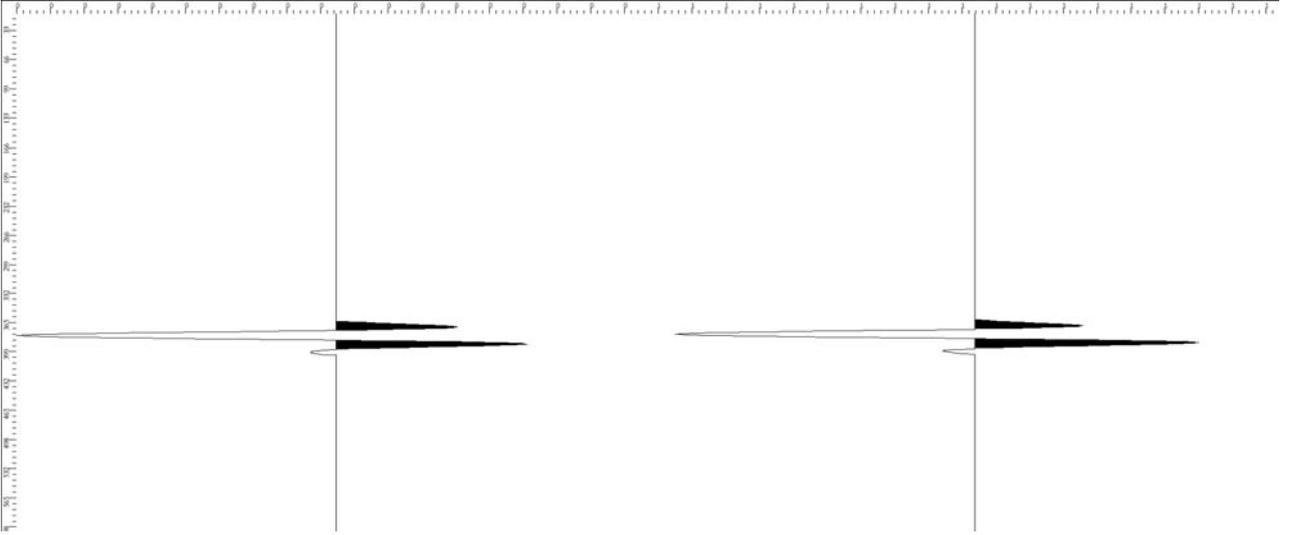


Рис. 1. Физические параметры среды в системе СГС:  $\alpha = 10^7 (\text{см}^3 / \text{гс}^2)^{1/2}$ ,  
 $R_1 = 10 \text{ см}$ ,  $\sigma = 10^9 \text{ с}^{-1}$ ,  $\bar{\omega} = 10^7 \text{ с}^{-1}$ ,  $B_0 = 10^3 \text{ Г}$ ,  $\rho_l = 0.1 \text{ г/см}^3$ ,  $c_e = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$ ,  
 $c_i = 1 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ ,  $\varepsilon = 0.1$ ,  $B_{z_0}(t) = 10^3 \exp(-\pi f_0(t-t_0)^2/8) \sin(2\pi f_0(t-t_0))$ ,  
 $f_0 = 100 \text{ Гц}$ ,  $t_0 = 0.015 \text{ сек}$ .

Оказалось, что справедлива более общая формула  $u_\varphi \sim \partial u_z / \partial t$ , полученная в частотном представлении в работе [14]  $u_z = i\omega_* \omega^{-1} u_y$ . Здесь  $\omega_*$  - характерная частота, на которой модули акустического отклика поперечных волн  $|u_y|$ ,  $|u_z|$  равны. Численно для нестационарной задачи с импульсными амплитудами показано, что на внутренней стороне обсадной колонны максимальные значения акустических амплитуд зависят от параметров насыщенной пористой среды и амплитуд магнитного поля следующим образом:

$$\dot{u}_z = \frac{\sigma}{c_e} \cdot \frac{B_0 B}{4\pi\rho}, \quad u_\varphi = \frac{\alpha}{\chi} \cdot \frac{B}{4\pi\rho} \cdot \frac{1}{k(R_1)}.$$

Здесь  $k(R_1)$ —функция внутреннего радиуса скважины, представленная на рис. 2. Представленная формула по измеренным значениям акустических амплитуд, амплитудам электромагнитных полей и плотности формации позволяет измерить электропроводность формации, и отношение ее двух кинетических коэффициентов: проницаемости и электроакустической константы.

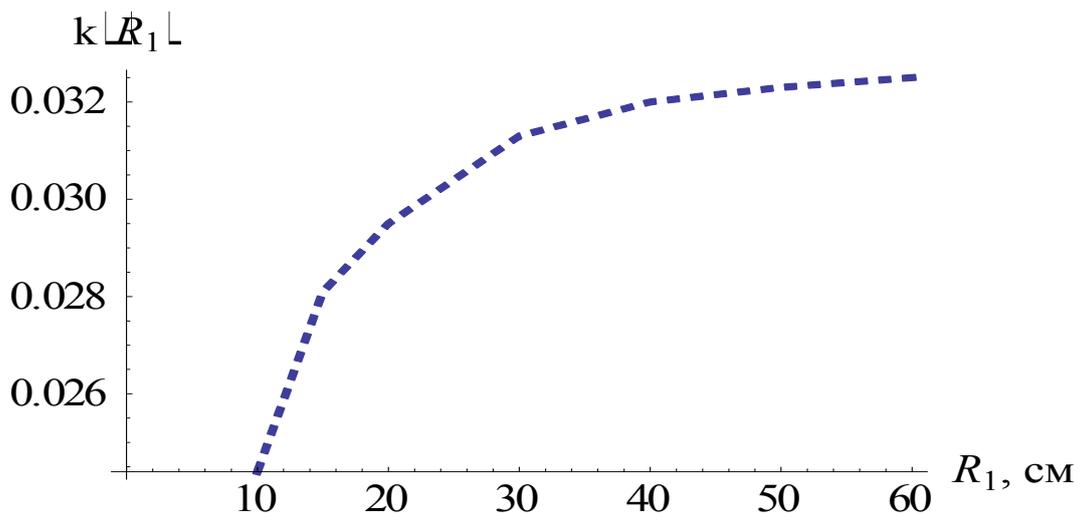


Рис. 2. Вычисленная функция внутреннего радиуса скважины  $k(R_1)$

### Заключение

Рассмотрена задача магнитоакустического отклика пористой насыщенной электролитом среды на индукционное внешнее электромагнитное воздействие при наличии постоянного магнитного поля. Оказалось, что справедлива более общая формула, полученная в частотном представлении в работе [14]. Численно для нестационарной задачи с импульсными амплитудами показано, что на внутренней стороне обсадной колонны максимальные значения акустических амплитуд зависят от параметров насыщенной пористой среды и амплитуд магнитного.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cheng C., Jinzhong Zh., Burns D. Effect of in-situ permeability on the propagation of Stoneley (tube) waves in a borehole // *Geophysics*. – 1981. – v. 46. – № 7. – P. 1042–1052.
2. Winkler K., Liu H., Johnson D. Permeability and borehole Stoneley waves: comparison between experiment and theory // *Geophysics*. – 1989. – v. 54. – № 1. – p. 66–75.
3. Paillet F.L. and Cheng C.H. *Acoustic Waves in Boreholes*, 1–264. – Boca Raton, Florida: CRC Press, 1991.
4. Burns D.R. Predicting Relative and Absolute Variations of In-Situ Permeability from Full-Waveform Acoustic Logs // *The Log Analyst*. – 1991. – v. 32. – No. 3. – pp. 246–255.
5. Tang X.M., Cheng C.H., Toksoz M.N. Dynamic Permeability and Borehole Stoneley Waves—A Simplified Biot-Rosenbaum Model // *J. of the Acoustical Soc. of America*. – 1991. – v. 90. – No.3. – pp. 1632–1646.
6. Tang X., Cheng C.H., Toksoz M.N. Stoneley-Wave Propagation in a Fluid Filled Borehole with a Vertical Fracture // *Geophysics*. – 1991. – v. 56. – No. 4. – pp. 447–460.
7. Saxena V. Permeability Quantification from Borehole Stoneley Waves // paper T. *Trans., Annual Logging Symposium, SPWLA*. – 1994. – pp.1–22.
8. Kimball C.V., Endo T. Quantitative Stoneley Mobility Inversion // paper BH 1.1. *Expanded Abstracts, Annual Meeting Technical Program, SEG*. – 1998. – pp. 252–255.
9. Dorovsky V.N., Podbereznyy M., Nefedkin Y. Stoneley attenuation length and pore fluid salinity // *Russian Geology and Geophysics*. – 2011. – T. 52. – № 2. – С. 250-258.
10. Dorovsky V., Dubinsky V., Podbereznyy M., Nefedkin Y. Effect of porous fluid properties on stoneley wave parameters [Электронный ресурс] // Saint Petersburg 2010. *Proceedings 4th International Conference (5-8 April 2010)*. – 2010.
11. Dorovsky V.N., Nefedkin Y.A., Fedorov A.I., Podbereznyy M.Y. A logging method for estimating permeability, velocity of second compressional wave, and electroacoustic constant in electrolyte-saturated porous formations // *Russian Geology and Geophysics*. – 2010. – v. 51. – № 12. – pp. 1285-1294.
12. Podbereznyy M., Nefedkin Y., Lamukhin A. Nonlinear effects in liquid and in fluid saturated friable media under DC Field // Saint Petersburg 2006: *International Conference and Exhibition (Saint Petersburg, 16-19 October 2006)*. – 2006. – С. C009
13. Dorovsky V., Dubinsky V., Fedorov A., Podbereznyy M., Nefedkin Yu., Perepechko Yu. Method and apparatus for estimating formation permeability and electroacoustic constant of an electrolyte-saturated multilayered rock taking into account osmosis. *Patent Application Publication US 2010/0254218 A1*. Oct. 7. – 2010.
14. Доровский В. Н., Доровский С.В. Электромагнитоакустический метод измерения электропроводности и дзета-потенциала // *Геология и геофизика*. – 2009. – Т. 50 (6). – С. 735-744.
15. Имомназаров Ш.Х., Доровский В.Н. Магнитозвуковые колебания в скважинных условиях, определяющие электрокинетические параметры пористой насыщенной среды // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 186–190.
16. Mikhailenko B.G. Spectral Laguerre method for the approximate solution of time dependent problems // *Applied Mathematics Letters*. – 1999. – No. 12. – pp. 105-110.
17. Mikhailenko B.G., Mikhailov A.A., Reshetova G.V. Numerical modeling of transient seismic fields in viscoelastic media based on the Laguerre spectral method // *Pure appl. Geophys.* – 2003. – No. 160. – pp. 1207-1224.
18. Mikhailenko B.G., Mikhailov A.A., Reshetova G.V. Numerical viscoelastic modeling by the spectral Laguerre method // *Geophysical Prospecting*. – 2003. – No. 51. – pp. 37-48.

19. Имомназаров Х.Х., Михайлов А.А. Применение спектрального метода для численного моделирования сейсмических волн в пористых средах при наличии диссипации энергии // СибЖВМ. – 2014. – Т. 17. – №2. – с. 139-147.

20. Berdyshev A, Imomnazarov Kh, Jian-Gang Tang, Mikhailov A. The Laguerre spectral method as applied to numerical solution of a two-dimensional linear dynamic seismic problem for porous media // Open Comput. Sci. – 2016. – v. 6. – pp.208–212.

## REFERENCES

1.Cheng, C., Jinzhong, Zh., Burns, D. (1981). Effect of in-situ permeability on the propagation of Stoneley (tube) waves in a borehole. *Geophysics*, 7, 1042—1052.

2.Winkler, K., Liu, H., Johnson, D. (1989). Permeability and borehole Stoneley waves: comparison between experiment and theory. *Geophysics*, 1, 66—75.

3.Paillet, F.L., Cheng, C.H. (1991). *Acoustic Waves in Boreholes*, Boca Raton, Florida: CRC Press.

4. Burns, D.R. (1991). Predicting Relative and Absolute Variations of In-Situ Permeability from Full-Waveform Acoustic Logs. *The Log Analyst*, 3, 246–255.

5. Tang, X.M., Cheng, C.H., Toksoz, M.N. (1991). Dynamic Permeability and Borehole Stoneley Waves—A Simplified Biot-Rosenbaum Model. *J. of the Acoustical Soc. of America*, 3, 1632–1646.

6. Tang, X., Cheng, C.H., Toksoz, M.N. (1991). Stoneley-Wave Propagation in a Fluid Filled Borehole with a Vertical Fracture, *Geophysics*, 4, 447–460.

7. Saxena, V. (1994). Permeability Quantification from Borehole Stoneley Waves. paper T. Trans., Annual Logging Symposium, SPWLA, 1–22.

8. Kimball, C.V., Endo, T. (1998). Quantitative Stoneley Mobility Inversion. paper BH 1.1. Expanded Abstracts, 1998 Annual Meeting Technical Program, SEG, 252–255.

9. Dorovsky, V.N., Podbereznyy, M., Nefedkin, Yu. (2011). Stoneley attenuation length and pore fluid salinity, *Russian Geology and Geophysics*, 2, 250-258.

10. Dorovsky, V., Dubinsky, V., Podbereznyy, M., Nefedkin, Yu. (2010) Effect of porous fluid properties on Stoneley wave parameters, Saint Petersburg 2010. Proceedings 4th International Conference (5-8 April 2010), 17.

11. Dorovsky, V.N., Nefedkin, Yu.A., Fedorov, A.I., Podbereznyy, M.Y. (2010). A logging method for estimating permeability, velocity of second compressional wave, and electroacoustic constant in electrolyte-saturated porous formations. *Russian Geology and Geophysics*, 12, 1285-1294.

12. Podbereznyy, M., Nefedkin, Yu., Lamukhin, A. (2006). Nonlinear effects in liquid and in fluid saturated friable media under DC Field. Saint Petersburg 2006: International Conference and Exhibition (Saint Petersburg, 16-19 October 2006), C009.

13. Dorovsky, V., Dubinsky, V., Fedorov, A., Podbereznyy, M., Nefedkin, Yu., Perepechko, Yu. (2010). Method and apparatus for estimating formation permeability and electroacoustic constant of an electrolyte-saturated multilayered rock taking into account osmosis. Patent Application Publication US 2010/0254218 A1.

14. Dorovsky, V. N., Dorovsky, S.V. (2009). Electromagnetic-acoustic method for measuring electrical conductivity and zeta potential. *Russian Geology and Geophysics*, 6, 735-744.

15. Imomnazarov, Sh. Kh., Dorovsky, V. N. (2017). Downhole magnetoacoustic oscillations determining the electrokinetic parameters of saturated porous medium. In *Sbornik materialov Interexpo Geo-Sibir'-2017: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: Vol. 1.]* (pp. 186–190). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].

16. Mikhailenko, B.G. (1999). Spectral Laguerre method for the approximate solution of time dependent problems, *Applied Mathematics Letters*, 12, 105–110.

17. Mikhailenko, B.G., Mikhailov, A.A., Reshetova, G.V. (2003). Numerical modeling of transient seismic fields in viscoelastic media based on the Laguerre spectral method. *Pure appl. Geophys*, 160, 1207-1224.
18. Mikhailenko, B.G., Mikhailov, A.A., Reshetova, G.V. (2003). Numerical viscoelastic modeling by the spectral Laguerre method, *Geophysical Prospecting*, 51, 37-48.
19. Imomnazarov, Kh.Kh., Mikhailov, A.A. (2014). Application of a spectral method for numerical modeling of propagation of seismic fields in porous media dissipative case. *Numerical Analysis and Applications*, 2, 139-147.
20. Berdyshev, A., Imomnazarov, Kh., Jian-Gang Tang, Mikhailov, A. (2016). The Laguerre spectral method as applied to numerical solution of a two-dimensional linear dynamic seismic problem for porous media. *Open Comput. Sci.* 6, 208–212.

© Ш. Х. Имомназаров, А. А. Михайлов, В. Н. Доровский, 2018

## **ОБ ОДНОЙ СИСТЕМЕ УРАВНЕНИЙ ТИПА БЮРГЕРСА, ВОЗНИКАЮЩЕЙ В ДВУХЖИДКОСТНОЙ СРЕДЕ**

*Холматжон Худайназарович Имомназаров*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sccc.ru

*Улугбек Каюмович Турдиев*

Каршинский филиал Ташкентского университета информационных технологий, 180100, Республика Узбекистан, г. Карши, Бешкентское шоссе, ст. преподаватель, тел. (375)228-02-32

В статье получена система уравнений типа Бюргерса с младшими членами относительно скоростей фаз из модели двухжидкостной среды в диссипативном приближении. Получена нелинейная система дифференциальных уравнений относительно двух одномерных функций описывающая локализацию уединенных бегущих волн. Рассмотрена задача Коши для одномерной системы уравнений типа Бюргерса. Получена нелинейная система интегральных уравнений Вольтерра второго рода являющаяся решением задачи Коши. Показано, что при исчезновении коэффициента межфазного трения, построенные решения для каждой подсистем переходят к известному решению задачи Коши для уравнения Бюргерса.

**Ключевые слова:** двухжидкостная среда, коэффициент трения, вязкость, уравнение Бюргерса, преобразование Флорина-Хопфа-Коула, точные решения нелинейных уравнений.

## **ABOUT A SYSTEM OF THE BURGERS-TYPE EQUATIONS IN A TWO-FLUID MEDIUM**

*Kholmatzhon Kh. Imomnazarov*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sccc.ru

*Ulugbek K. Turgunov*

Karshi Branch of the Tashkent University of Information Technologies, Beshkent Kosse, Karshi, 180100, Republic Uzbekistan, Senior Lecturer, phone: (375)228-02-32

In this paper, we obtain a system of the Burgers-type equations with lower terms relative to the phase velocities from a two-fluid model in the dissipative approximation. A nonlinear system of differential equations with respect to the two one-dimensional functions describing the localization of solitary traveling waves has been obtained. The Cauchy problem for a one-dimensional system of the Burgers type equations is considered. A nonlinear system of the Volterra integral equations of the second kind is obtained that is a solution of the Cauchy problem. It is shown that with the disappearance of the interfacial friction coefficient, the solutions constructed for each subsystem transfer to the known solution of the Cauchy problem for the Burgers equation.

**Key words:** two-fluid medium, coefficient of friction, viscosity, Burgers equation, Florin-Hopf-Cole transformation, exact solutions of nonlinear equations.

## *Введение*

В последние десятилетия, математики становятся все более заинтересованы в проблемах, связанных с поведением решений систем уравнений в частных производных, с малым параметром при старших производных и с учетом кинетических параметров. Эти проблемы возникли из физических приложений, в основном из современной гидродинамики (сжимаемых многофазных жидкостей с малыми значениями вязкости подсистем).

Аналогия уравнению Бюргерса возникает, например, при исследовании слабо-нелинейной одномерной акустической волны, движущейся с линейной скоростью звука. В этом случае нелинейные по скоростям члены в системе уравнений типа Бюргерса происходят из зависимости скоростей звука от амплитуды звуковой волны, а члены со второй производной и разности скоростей представляют затухание звуковых волн, связанное с диссипацией энергии. Другими словами, эти члены, обеспечивают непрерывность решений и представляют диссипативные процессы, связанные с производством энтропии. Эти члены, в свою очередь, обеспечивают неопрокидывание волн [1].

В последнее время многие методы использовались для нахождения аналитических решений нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Среди множества работ можно выделить два класса исследований, непосредственно связанных с данными исследованиями. Первый класс работ: процедура усечения в анализе Пенлеве [2] в которой авторы определяют свойство Пенлеве, для определения пары Лакса для уравнений Бюргерса, КдФ и модифицированных уравнений КдФ; билинейный метод Хироты [3], в котором многократные столкновения  $N$  солитонов с изменяющимися амплитудами получены для уравнения КдФ; метод Прелле-Зингера [4], в котором показано, что система дифференциальных уравнений имеет элементарный интеграл, выражаемый через экспоненты, логарифмы и алгебраические функции; метод факторизации [5], в котором решения в виде бегущих волн стандартных и составных уравнений КдФ-Бюргерса найдены с использованием факторизации; или метод однородного баланса [6], в котором получены решения в виде уединенных волн двух типов вариантов уравнений Буссинеска. Можно также упомянуть метод пробных функций [7], в котором преобразования решений, полученные методом Вайсса-Табора-Карневале используются для исследования уравнения Курамото-Сивашинского; метод нелинейного преобразования [8], с помощью которого авторы построили решения бегущих волн решения нелинейных диффузионных уравнений с полиномиальными нелинейностями; также следует отметить хорошо известный метод обратного рассеяния [9] и преобразование Беклунда [10] при исследовании нелинейных дифференциальных уравнений.

Уравнение Бюргерса уникально тем, что с помощью подстановки Флорина-Хопфа-Коула оно сводится к линейному уравнению теплопроводности для вспомогательной функции. Данная линеаризация позволяет записать общее решение уравнения Бюргерса. Эта преобразование для однородного уравнения

было найдено в работе [11], но стало более известным после появления работ [12, 13] и поэтому получило название подстановки Хопфа–Коула. Линеаризация позволяет выписать решение задачи Коши в интегральном виде. Соответствующий интеграл при произвольном начальном профиле в аналитическом виде не вычисляется, но для ряда случаев это сделать удастся. Такой подход позволяет регулярным образом выписать точное решение уравнения Бюргерса для ряда физически интересных ситуаций. Весьма примечательно, что подстановка Хопфа–Коула линеаризует и неоднородное уравнение Бюргерса, на что впервые было указано в работе Карабутова А.А., Лапшина Е.А., Руденко О.В. [14].

Метод преобразование Флорина-Хопфа-Коула позволяет описывать структуру волны в произвольный момент времени. Рассматриваемая система уравнений является связанной системой уравнений Бюргерса с младшими членами и является частным случаем системы уравнений двухскоростной гидродинамики в одномерном случае [15-18].

### *Система уравнений типа Бюргерса*

Одномерным аналогом уравнений Навье-Стокса для сжимаемых жидкостей можно считать систему уравнений типа Бюргерса, которая представляет собой систему нелинейных уравнений конвекции-диффузии

$$u_t + uu_x = \nu u_{xx} - \tilde{b}(u - v), \quad (1)$$

$$v_t + \nu v_x = \tilde{\nu} v_{xx} + b(u - v), \quad (2)$$

где величины  $u$  и  $v$  можно рассматривать, как скорости подсистем с размерностью, составляющих двухскоростной континуум с соответствующими парциальными плотностями  $\rho_1$  и  $\rho_2$ ,  $\rho = \rho_1 + \rho_2$  – общая плотность континуума;

$\tilde{b} = \frac{\rho_2}{\rho_1} b$ ,  $b$  – коэффициент межкомпонентного трения, который является ана-

логом коэффициента Дарси для пористых сред. Положительные константы  $\nu$  и  $\tilde{\nu}$  играют роль кинематических вязкостей подсистем. Систему типа Бюргерса мы иногда будем называть двухскоростной гидродинамикой без давления.

У системы уравнений двухскоростной гидродинамики и системы уравнений типа Бюргерса много общего. Например, квадратичная нелинейность по  $u$  и  $v$  члены с адвективным слагаемым, отвечающим зависимости звука от амплитуды звуковых волн и линейных вязкостей  $\nu$ ,  $\tilde{\nu}$ , коэффициента трения  $b$  [1] в правых частях, отвечающие за затухание звуковых волн. Что касается свойств решений, то они совершенно разные. У системы уравнения Бюргерса при исчезающих коэффициентах  $\nu$ ,  $\tilde{\nu}$ ,  $b$ , формируются как сильные (ударные волны), так и слабые разрывы, в то время как решения системы двухскоростной гидродинамики такими особенностями не обладают. Однако область применимости

этой системы отнюдь не ограничиваются приведенными примерами, такие системы возникают во многих задачах, чем и определяется ее значение.

Рассмотрим для системы (1), (2) в полосе  $\Gamma_{[0,T]} = \{(t, x) : 0 \leq t \leq T, -\infty < x < \infty\}$  задачу Коши со следующими начальными данными

$$u|_{t=0} = u_0(x), \quad -\infty < x < \infty \quad (3)$$

$$v|_{t=0} = v_0(x), \quad -\infty < x < \infty \quad (4)$$

Нас будут интересовать гладкие решения задачи Коши для системы уравнений типа Бюргерса (1), (2).

Сначала нас интересует решения системы (1), (2) в виде бегущих волн:

$$u(t, x) = U(\xi), \quad \xi = x - ct, \quad (5)$$

$$v(t, x) = V(\xi), \quad (6)$$

где  $c$  - скорость волны. Мы рассматриваем только ситуацию  $c > 0$ . Это означает волна, идущая вправо. Подставляя (5), (6) в (1), (2) то (1), (2) сводится в систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно  $U(\xi)$  и  $V(\xi)$ :

$$-cU' + UU' = vU'' - \tilde{b}(U - V), \quad (7)$$

$$-cV' + VV' = \tilde{v}V'' + b(U - V), \quad (8)$$

где штрих означает производную по  $\xi$ .

Система уравнений (7), (8) эквивалентна следующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dU}{d\xi} = \tilde{U},$$

$$\frac{dV}{d\xi} = \tilde{V},$$

$$v \frac{d\tilde{U}}{d\xi} = (U - c)\tilde{U} + \tilde{b}(U - V),$$

$$\tilde{v} \frac{d\tilde{V}}{d\xi} = (V - c)\tilde{V} - b(U - V).$$

Из уравнений после несложных преобразований получим

$$\rho_1 v \frac{d\tilde{U}}{d\xi} + \rho_2 \tilde{v} \frac{d\tilde{V}}{d\xi} = \rho_2 (V - c) \tilde{V} + \rho_1 (U - c) \tilde{U} .$$

Отсюда с учетом ( ), ( ) получим

$$\rho_1 v \frac{d\tilde{U}}{d\xi} + \rho_2 \tilde{v} \frac{d\tilde{V}}{d\xi} = \rho_2 (V - c) \frac{d(V - c)}{d\xi} + \rho_1 (U - c) \frac{d(U - c)}{d\xi} .$$

Это уравнение допускает следующий первый интеграл

$$v \frac{\rho_1}{\rho_2} \tilde{U} + \tilde{v} \tilde{V} - \frac{1}{2} \left[ (V - c)^2 + \frac{\rho_1}{\rho_2} (U - c)^2 \right] = C ,$$

где  $C$  - произвольная постоянная.

### **Формула решения задачи Коши для системы уравнений типа Бюргера**

Удобно сделать замену переменных Флорина-Хопфа-Коула

$$\varphi = \text{Exp} \left[ -\frac{1}{2v} \int u dx \right] ,$$

$$\psi = \text{Exp} \left[ -\frac{1}{2\tilde{v}} \int v dx \right] .$$

При этом функции  $u$  и  $v$  выражаются через функции  $\varphi$  и  $\psi$  по формулам

$$u = -2v \frac{\varphi_x}{\varphi} ,$$

$$v = -2\tilde{v} \frac{\psi_x}{\psi} .$$

В терминах функции  $\varphi$  и  $\psi$  система динамических уравнений (1) и (2) примет вид

$$\left( \frac{\varphi_t}{\varphi} \right)_x = \left( v \frac{\varphi_{xx}}{\varphi} \right)_x - \frac{\tilde{b}}{v} \left( \ln \frac{\varphi^v}{\psi^{\tilde{v}}} \right)_x ,$$

$$\left( \frac{\psi_t}{\psi} \right)_x = \left( \tilde{v} \frac{\psi_{xx}}{\psi} \right)_x + \frac{b}{\tilde{v}} \left( \ln \frac{\varphi^v}{\psi^{\tilde{v}}} \right)_x$$

Решения задачи Коши для данной системы с данными

$$\begin{aligned}\varphi|_{t=0} &= \varphi_0(x), & -\infty < x < \infty \\ \psi|_{t=0} &= \psi_0(x), & -\infty < x < \infty\end{aligned}$$

ИМЕЮТ ВИД

$$\begin{aligned}\varphi(t, x) &= \int_{-\infty}^{\infty} G^{\nu}(x, \xi, t) \varphi_0(\xi) d\xi - \frac{\tilde{b}}{\nu} \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} G^{\nu}(x, \xi, t-\tau) \varphi(\xi, \tau) (\nu \ln \varphi(\xi, \tau) - \tilde{\nu} \ln \psi(\xi, \tau)) d\xi d\tau, \\ \psi(t, x) &= \int_{-\infty}^{\infty} G^{\tilde{\nu}}(x, \xi, t) \psi_0(\xi) d\xi + \frac{b}{\tilde{\nu}} \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} G^{\tilde{\nu}}(x, \xi, t-\tau) \psi(\xi, \tau) (\nu \ln \varphi(\xi, \tau) - \tilde{\nu} \ln \psi(\xi, \tau)) d\xi d\tau\end{aligned}$$

где  $G^{\nu}(x, \xi, t)$  -- есть фундаментальное решение одномерного уравнения диффузии с коэффициентом теплопроводностью  $\nu$ .

Далее предположим, также как в [13], что данные Коши  $u_0(x)$ ,  $v_0(x)$  удовлетворяют условиям убывания на бесконечности.

Тогда для решения задачи Коши (1)-(4) справедливы формулы

$$\begin{aligned}u(t, x) &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-\xi}{t} \text{Exp}\left[-\frac{1}{2\nu} F(u_0(\xi), x, \xi, t)\right] d\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} \text{Exp}\left[-\frac{1}{2\nu} F(u_0(\xi), x, \xi, t)\right] d\xi} - \\ &= \frac{\int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{1 + \frac{\tau}{t-\tau}} \left(u(t, x) - \frac{x-\xi}{t-\tau}\right) F_2(u, \nu, x, \xi, t, \tau) d\xi d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} \text{Exp}\left[-\frac{1}{2\nu} F(u_0(\xi), x, \xi, t)\right] d\xi},\end{aligned}\tag{9}$$

$$\begin{aligned}v(t, x) &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-\xi}{t} \text{Exp}\left[-\frac{1}{2\tilde{\nu}} F(v_0(\xi), x, \xi, t)\right] d\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} \text{Exp}\left[-\frac{1}{2\tilde{\nu}} F(v_0(\xi), x, \xi, t)\right] d\xi} - \\ &= \frac{\int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{1 + \frac{\tau}{t-\tau}} \left(v(t, x) - \frac{x-\xi}{t-\tau}\right) G_2(u, \nu, x, \xi, t, \tau) d\xi d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} \text{Exp}\left[-\frac{1}{2\tilde{\nu}} F(v_0(\xi), x, \xi, t)\right] d\xi},\end{aligned}\tag{10}$$

где функции  $F$ ,  $F_2$  и  $G_2$  определены по следующими формулами [19]

$$F_2(u, v, x, \xi, t, \tau) = \frac{\tilde{b}}{2v} \{F_1(u, x, \xi, t, \tau) - F_1(v, x, \xi, t, \tau)\} \text{Exp} \left[ -\frac{1}{2v} F_1(u, x, \xi, t, \tau) \right],$$

$$G_2(u, v, x, \xi, t, \tau) = \frac{b}{2\tilde{v}} \{F_1(v, x, \xi, t, \tau) - F_1(u, x, \xi, t, \tau)\} \text{Exp} \left[ -\frac{1}{2\tilde{v}} F_1(u, x, \xi, t, \tau) \right],$$

$$F_1(u, x, y, t, \tau) = \frac{(x-y)^2}{2(t-\tau)} + \int_{-\infty}^y u(\tau, \eta) d\eta,$$

$$F(u, x, y, t) = \frac{(x-y)^2}{2t} + \int_{-\infty}^y u(t, \eta) d\eta.$$

**Замечание.** При исчезновении коэффициента трения  $b$  (в отсутствии диссипации энергии, обусловленной коэффициентом трения формулы (9), (10) переходит к известному решению задачи Коши для уравнения Бюргерса [14].

### *Заключение*

Таким образом, получена система уравнений типа Бюргерса, как частный случай двухскоростной гидродинамики. Данная система отличается от системы Навье-Стокса для двухжидкостной среды отсутствием давления и условиями несжимаемости. По этой причине семейство задач для системы уравнений типа Бюргерса иногда называется двухскоростной гидродинамикой по аналогии односкоростной гидродинамики [20]. Рассмотрена задача Коши для одномерной системы уравнений типа Бюргерса. Получена формула для ее решения в виде системы нелинейных уравнений Вольтерра второго рода. Показано, что при исчезновении коэффициента межфазного трения, построенные решения для каждой из подсистем переходят к известному решению задачи Коши для уравнения Бюргерса.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куликовский А.Г., Свешников Е.И., Чугайнова А.П. Математические методы изучения разрывных решений нелинейных гиперболических систем уравнений, Москва, 2010. – 122с.
2. Weiss J. Tabor M., Carnevale G. The Painlevé property for partial differential equations // Journal of Mathematical Physics. – 1983. – v. 24. – No. 3. – pp. 522-526.
3. Hirota, Ryogo Exact solution of the Korteweg–de Vries equation for multiple collisions of solitons // Physical Review Letters. – 1971. – v. 27. – pp. 1192-1194.
4. Prellle Myra Jean, Singer M.F. Elementary first integrals of differential equations // Transactions of the American Mathematical Society. – 1983. – v. 279. – No.1. – pp. 215-229.

5. Cornejo-Pérez, O., Negro, J., Nieto, L. M., and Rosu, H. C. Traveling-Wave Solutions for Korteweg-de Vries-Burgers Equations through Factorizations // *Foundations of Physics*. – 2006. v. 36. – No.10. – pp. 1587-1599.
6. Wang Mingliang Solitary wave solutions for variant Boussinesq equations // *Physics letters A*. – 1995. – v. 199. – No. 3-4. – pp. 169-172.
7. Kudryashov N.A.. Exact solutions of the generalized Kuramoto-Sivashinsky equation // *Physics Letters A*. – 1990. – v. 147. – No. 5-6. – pp. 287-291.
8. Otwinowski M., Paul R., Laidlaw W.G. Exact travelling wave solutions of a class of nonlinear diffusion equations by reduction to a quadrature // *Physics letters A*. – 1988. – v. 128. – No. 9. – pp. 483-487.
9. Ablowitz, M.J., Clarkson P.A. Solitons, nonlinear evolution equations and inverse scattering. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. – 1991.
10. Miura, M. R. Backlund Transformation, Springer-Verlag, Berlin. – 1978.
11. Forsyth A.R. Theory of differential equations, v. VI. Cambridge: Cambridge University Press. – 1906. – 582 p.
12. Cole J.D. On a quasilinear parabolic equation occurring in aerodynamics // *Quart. Appl. Math.* – 1951. – V. 9. – P. 225-236.,
13. Hopf E. The partial differential equation  $u_t + uu_x = \mu u_{xx}$  // *Communs Pure and Appl. Math.* – 1950. – V. 3. – №3. – pp. 201-230.
14. Карабутов А.А., Лапшин Е.А., Руденко О.В. О взаимодействии светового излучения со звуком в условиях проявления акустической нелинейности // *ЖЭТФ*. – 1976. – Т. 71. – № 1(7). – С. 111–121.
15. Доровский В.Н. Континуальная теория фильтрации // *Геология и геофизика*. – 1989, – No.7. – С.39-45.
16. Доровский В.Н., Перепечко Ю.В. Феноменологическое описание двухскоростных сред с релаксирующими касательными напряжениями // *ПМТФ*. – 1992. – No.9. – С.94-105.
17. Доровский В.Н., Перепечко Ю.В. Теория частичного плавления // *Геология и геофизика*. – 1989. – No. 9. – С.56-64.
18. Перепечко Ю. В., Сорокин К. Э., Имомназаров Х. Х. Влияние акустических колебаний на конвекцию в сжимаемой двухжидкостной среде // *Труды XVII Международная конференция "Современные проблемы механики сплошной среды"*, Ростова-на-Дону. – 2014. – С. 166-169.
19. Vasiliev G., Imomnazarov Kh., Kalimoldayev M., Mamasoliyev B.J Cauchy Problem for System of the Burgers Equations Arising in the Two-velocity Hydrodynamics // *Math. Model. Nat. Phenom.* – 2017– Vol. 12. – №3. – P. 134-138.
20. Синай В.И., Я.Г. Новые результаты в математической и статистической гидродинамике // *УМН*. – 2000. – т. 55. – вып. 4(334). – С. 25–58.

## REFERENCES

1. Kulikovskii, A.G., Sveshnikov, E. I., & Chugaynova, A. P. (2010). *Matematicheskie metody izucheniya razrivnikh resheniy nelineynikh geperbolicheskikh system uravneniy* [Mathematical methods for studying discontinuous solutions of nonlinear hyperbolic systems of equations]. (Leksionnie kursi NOS. Vip. 16), Moskva [in Russian].
2. Weiss J. Tabor M., Carnevale G. (1983). The Painlevé property for partial differential equations, *Journal of Mathematical Physics*, 3, 522-526.
3. Hirota, Ryogo (1971). Exact solution of the Korteweg–de Vries equation for multiple collisions of solitons, *Physical Review Letters*, 27, 1192-1194.
4. Prolle Myra Jean, Singer M.F. (1983). Elementary first integrals of differential equations, *Transactions of the American Mathematical Society*, 1, 215-229.

5. Cornejo-Pérez, O., Negro, J., Nieto, L. M., and Rosu, H. C. (2006). Traveling-Wave Solutions for Korteweg-de Vries-Burgers Equations through Factorizations, *Foundations of Physics*, 10, 1587-1599.
6. Wang Mingliang (1995). Solitary wave solutions for variant Boussinesq equations, *Physics letters A*, (3-4), 169-172.
7. Kudryashov N.A. (1990). Exact solutions of the generalized Kuramoto-Sivashinsky equation, *Physics Letters A*, (5-6), 287-291.
8. Otwinowski M., Paul R., Laidlaw W.G. (1988). Exact travelling wave solutions of a class of nonlinear diffusion equations by reduction to a quadrature, *Physics letters A*, 9, 483-487.
9. Ablowitz, M.J., Clarkson P.A. (1991). Solitons, nonlinear evolution equations and inverse scattering. Vol. 149. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
10. Miura, M. R. (1978). Backlund Transformation, Springer-Verlag, Berlin.
11. Forsyth A.R. (1906). Theory of differential equations, v. VI. Cambridge: Cambridge University Press.
12. Cole J.D. (1951). On a quasilinear parabolic equation occurring in aerodynamics, *Quart. Appl. Math.* 9, 225-236.
13. Hopf E. (1950). The partial differential equation  $u_t + uu_x = \mu u_{xx}$ , *Communs Pure and Appl. Math.*, 3, 201-230.
14. Karabutov, A.A., Lapshin E. A., Rudenko O.V. (1976). On the interaction of light radiation with sound under conditions of acoustic nonlinearity, *J. of Exper. Theor. Physics [JETP]*, 1(7), 111-121 [in Russian].
15. Dorovsky, V.N. (1989). Continual theory of filtration, *Sov. Geology and Geophysics*, 7, 34-39.
16. Dorovsky, V.N., Perepechko, Yu.V. (1992). Phenomenological description of two-velocity media with relaxing shear stresses, *J. Appl. Mech. and Tech. Phys.*, 3, 403-409.
17. Dorovsky, V.N., Perepechko, Yu.V. (1989). Theory of the partial melting, *Sov. Geology and Geophysics*, 9, 56-64.
18. Perepechko, Yu.V., Sorokin, K.E., Imomnazarov Kh.Kh. (2014). The influence of acoustic vibrations on convection in a compressible two-fluid medium. In *Sbornik materialov Sovremennye problem mekhaniki splushnoy sredi [Proceedings XVII International Conference "Contemporary Problems of Continuum Mechanics"*, 2014], (pp. 166-169). Rostov-on-Don, [in Russian].
19. Vasiliev G., Imomnazarov Kh., Kalimoldayev M., Mamasoliyev B.J. (2017). Cauchy Problem for System of the Burgers Equations Arising in the Two-velocity Hydrodynamics, *Math. Model. Nat. Phenom.* 3, 134-138.
20. Sinai, W. E, Ya. G. (2000). Recent results on mathematical and statistical hydrodynamics, *Uspekhi Mat. Nauk*, 4(334), 25-58.

© X. X. Имомназаров, У. К. Турдиев, 2018

## ОБ ОДНОМ ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ УРАВНЕНИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПОРОУПРУГОСТИ

*Холматжон Худайназарович Имомназаров*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sccc.ru

*Равшанбек Кадамбаевич Юсупов*

Каракалпакский государственный университет им. Бердаха, 742000, Республика Узбекистан, г. Нукус, ул. Академика Ч. Абдилова, 1, ст. преподаватель, тел. (99861)223-60-47

В статье получена замкнутая одномерная система динамических интегродифференциальных уравнений первого порядка относительно компонент скоростей вектора смещений упругого пористого тела, насыщающей жидкости и тензора напряжений в диссипативном приближении. Рассматриваемая математическая модель является термодинамически согласованной и в общем случае удовлетворяет первым физическим принципам. Распространение волн в насыщенной жидкостью пористой среде записывается одномерной системой уравнений через взаимосвязь компонент вектора скорости смещений и компонент тензора напряжений, используя принцип суперпозиции Больцмана в интегралах свёртки с функциями последствия. Исследована зависимость дисперсионного соотношения полученной системы от физических и кинетических параметров.

**Ключевые слова:** пористая среда, сила трение, проницаемость, гиперболическая система, скорость смещений, относительная скорость, интеграл свертки.

## ABOUT ONE INTEGRAL AND DIFFERENTIAL EQUATION OF THE DYNAMIC POROELASTICITY THEORY

*Kholmatzhon Kh. Imomnazarov*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sccc.ru

*Ravshanbek K. Yusupov*

Karakalpak State University named after Berdakh, 1, Academician Ch. Abdirov St., Nukus, 742000, Republic Uzbekistan, Senior Lecturer, phone: (99861)223-60-47

In this paper, we obtain a closed one-dimensional system of first order dynamic integro-differential equations relative to the velocity components of the displacement vector of an elastic porous body, a saturating fluid, and a stress tensor in the dissipative approximation. The considered mathematical model is thermodynamically consistent and in the general case satisfies the first physical principles. The propagation of waves in a liquid-saturated porous medium is written down as a one-dimensional system of equations in terms of the relationship between the displacement velocity components and the stress tensor components, using the Boltzmann superposition principle in convolution integrals with after-effect functions. The dependence of the dispersion relation of the obtained system on physical and kinetic parameters is investigated.

**Key words:** porous medium, force friction, permeability, hyperbolic system, displacement velocity, relative velocity, convolution integral.

## *Введение*

Присутствие воды и газа в подземных резервуарах приводит к фазовым сдвигам и зависимости от частоты изменения амплитуды сейсмических волн (например, [1, 2]). В работах [3-13] ввели двухфазную модель среды для описания взаимосвязанного распространения волн в пористой флюидонасыщенной среде. Большое внимание уделяется также моделям диссипации пористой среды и способам ее учета в уравнениях состояния.

Фундаментальное свойство упруго-пористой насыщенной среды, следующее из теории Био, состоит в том, что в таких средах могут распространяться две продольные волны, быстрая и медленная, а также поперечная волна.

Эта система описывает распространения сейсмических волн в пористой среде и в изотропном случае содержит четыре независимых упругих параметра [3-13]. Линеаризованная теория континуальной теории фильтрации является замкнутой системой дифференциальных уравнений второго порядка относительно векторов скорости смещений упругого пористого тела и скорости жидкости [14, 15]. Также как теория Френкеля-Био описывает распространения сейсмических волн в пористой среде. Фундаментальное свойство упруго-пористой насыщенной среды, состоит в том, что в таких средах могут распространяться две продольные волны, быстрая и медленная, а также поперечная волна. В отличие от него в изотропном случае описывается тремя независимыми упругими параметрами.

В низкочастотном режиме разработаны методы моделирования во временной области [14, 15] и в указанной там литературе. В высокочастотном режиме возникают дробные производные, что приводит к значительному усложнению численного моделирования волновых полей для модели Biot-JKD [11]. Предыдущие значения решения действительно необходимы для оценки оператора свертки, что означает, что временная эволюция решения должна быть учтена, т.е. система уравнений является с памятью. Это значительно увеличивает требования к оперативной памяти при численном моделировании и делает невозможным крупномасштабное моделирование. Известно, что в литературе были предложены два подхода. Первый подход состоит в дискретизации оператора свертки [16], а второй основан на использовании диффузионного представления дробной производной [17]. В последнем подходе произведение свертки заменяется континуумом диффузионных переменных - или переменными памяти - удовлетворяющие локальным дифференциальным уравнениям [18]. Этот континуум затем дискретизируется с использованием соответствующих квадратурных формул, приводящих к модели Biot-DA (модели Био - диффузионное приближение).

В [16], диффузионный подход предложен для одномерной однородной модели пористых сред. По сравнению с [16], были внесены важные улучшения: хорошее представление вязкой диссипации во всем диапазоне частот; оптимизация модели; оценка вычислительных усилий с точки зрения требуемой точности.

В 1987 году Джонсон-Коплик-Дашен (JKD) [16] получили общее выражение для диссипации в случае случайных пор. Вязкие силы зависят в этой модели в частотной области от квадратного корня от частоты. Следовательно, это приводит во временной области к интегродифференциальному уравнению с сингулярным ядром.

**Одномерная система динамических уравнений пороупругости  
для поперечных волн в диссипативном приближении**

Рассмотрим распространение нелинейных поперечных сейсмических волн в случае, когда парциальные плотности матрицы пористого тела  $\rho_s$ , насыщающей жидкости  $\rho_l$ , а также модуль сдвига  $\mu$  являются постоянными, а сила трения, определяющая диссипацию энергии, является функцией разности скоростей  $\varphi = \varphi(u - v)$ . При таких предположениях система нелинейных одномерных уравнений пороупругости может быть записана в следующем виде [17, 18]:

$$\begin{aligned} u_t &= \tilde{\sigma}_x - \varepsilon\varphi, \\ \tilde{\sigma}_t &= c_t^2 u_x, \\ v_t &= \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u$  и  $v$  - скорости пористой матрицы и насыщающей жидкости, соответственно;  $u_t = \frac{\partial u}{\partial t}$ ,  $u_x = \frac{\partial u}{\partial x}$  - операторы дифференцирования;  $\rho_s = \rho_s^f (1 - \phi)$ ,  $\rho_l = \rho_l^f \phi$ ,  $\phi$  - пористость,  $\rho_s^f$  и  $\rho_l^f$  - физические плотности пористого тела и насыщающей жидкости, соответственно;  $\rho_s \tilde{\sigma}$  - тензор напряжений,  $c_t = \sqrt{\mu / \rho_s}$ ,  $\varepsilon = \rho_l / \rho_s$ .

Линеаризуем систему (1), получим систему уравнений первого порядка

$$\begin{aligned} u_t &= \tilde{\sigma}_x - \varepsilon\chi\rho_l(u - v), \\ \tilde{\sigma}_t &= c_t^2 u_x, \\ v_t &= \chi\rho_l(u - v), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\chi$  - коэффициент межфазного трения.

В случае, когда пористая среда является с памятью в системе (2) вводятся интегральные операторы свертки [16, 19]:

$$\begin{aligned} u_t &= \tilde{\sigma}_x - \varepsilon\rho_l\chi^*(u - v), \\ \tilde{\sigma}_t &= c_t^2 u_x, \\ v_t &= \rho_l\chi^*(u - v) \end{aligned} \quad (3)$$

где  $*$  - является оператором свертки во времени.

## Дисперсионный анализ

Исследуем условие существования решения системы (3) в виде плоских монохроматических волн

$$(u, v, \tilde{\sigma}) = (u_0, v_0, \tilde{\sigma}_0) e^{i(kx - \omega t)}. \quad (4)$$

Подставляя решения (4) в систему (3), приходим к однородным линейным однородным линейным алгебраическим уравнениям на амплитуды  $u_0, v_0, \tilde{\sigma}_0$

$$\begin{aligned} (\omega + i\varepsilon\rho_l \hat{\chi}(\omega))u_0 - i\varepsilon\rho_l \hat{\chi}(\omega)v_0 + k\tilde{\sigma}_0 &= 0, \\ kc_t^2 u_0 + \omega\tilde{\sigma}_0 &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$i\rho_l \hat{\chi}(\omega)u_0 + (\omega + i\rho_l \hat{\chi}(\omega))v_0 = 0.$$

В (5)  $\hat{\chi}(\omega)$  - преобразование Фурье от функции  $\chi(t)$  по времени. Условие существования решений вида (4) сводится к равенству нулю определителя системы (5) и дисперсионное соотношение принимает вид

$$\frac{\omega^2}{k^2} \left( 1 + i \frac{\hat{\chi}(\omega)}{\omega} \frac{\rho_l}{\rho_s} \rho \right) = \frac{\mu}{\rho_s} \left( 1 + i \frac{\hat{\chi}(\omega)}{\omega} \rho_l \right).$$

Эта выражение позволяет определить скорость  $c_t(\omega) = \omega / k$ .

Представим  $c_t(\omega)$  в виде

$$c_t(\omega) = A(\omega) - iB(\omega), \quad (6)$$

где  $A(\omega) = \text{Re } c_t(\omega)$ ,  $B(\omega) = -\text{Im } c_t(\omega)$ .

В этом случае выражение (4) можно преобразовать [15]

$$(u, v, \tilde{\sigma}) = (u_0, v_0, \tilde{\sigma}_0) e^{-i\omega(t - x/u(\omega))} e^{-x/\lambda_\partial(\omega)}, \quad (7)$$

Скорость поперечной волны  $u(\omega)$  и длина поглощения  $\lambda_\partial(\omega)$  определяются посредством  $A(\omega)$  и  $B(\omega)$  формулами

$$\begin{aligned} u(\omega) &= \frac{A^2(\omega) + B^2(\omega)}{A(\omega)}, \\ \lambda_\partial(\omega) &= \frac{A^2(\omega) + B^2(\omega)}{\omega B(\omega)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Высокочастотным пределам фазовой скорости волн сдвига удовлетворяет соотношение  $\bar{c}_t^\infty = \sqrt{\mu / \rho_s}$ .

На рис. 1 и 2 показаны дисперсионные кривые соответствующие скорости и длина поглощение для поперечной волны. Физические параметры, используемые в численных экспериментах, взяты из [15, 16]:

$$\hat{\chi}(\omega) = \frac{\eta}{\kappa \rho_l} / \sqrt{1 + i \frac{\omega}{\Omega}}, \quad \Omega = \frac{\eta \phi^2 \Lambda^2}{4 a^2 \kappa^2 \rho_l^f}, \quad \rho_l^f = 1\,040 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \quad \eta = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ (Па} \cdot \text{с)},$$

$$\rho_s^f = 2\,650 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \quad \mu = 2.93 \cdot 10^9 \text{ (Па)}, \quad \phi = 0.335, \quad a = 2, \quad \kappa = 10^{-11} \text{ (м}^2\text{)}, \quad \Lambda = 2.19 \cdot 10^{-5} \text{ (м)}.$$

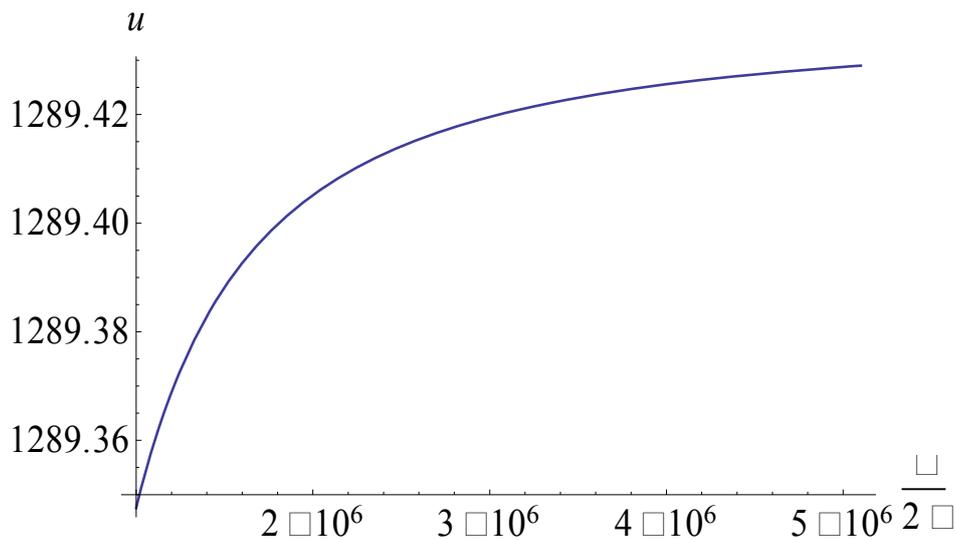


Рис. 1

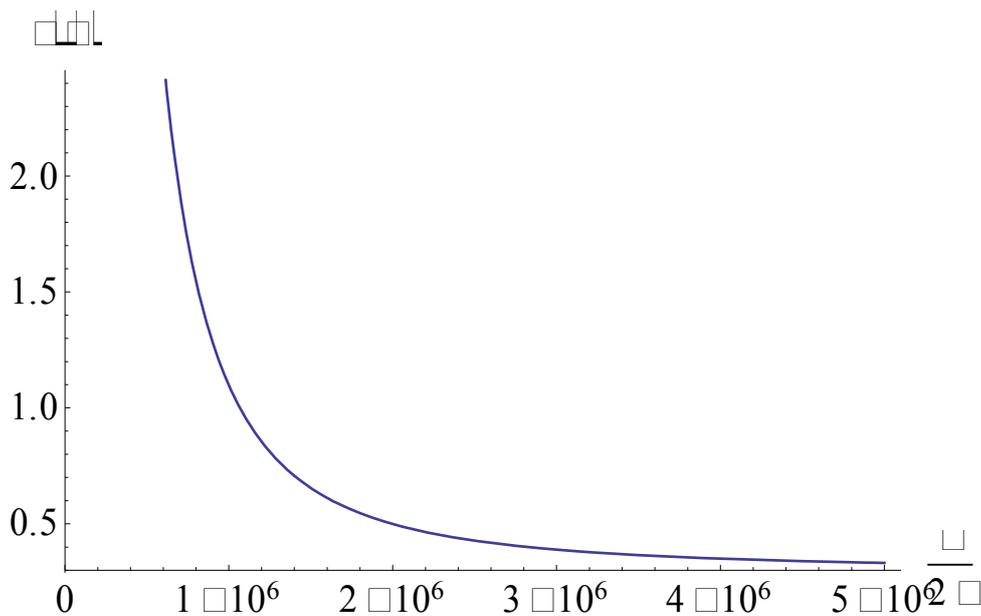


Рис. 2

Систему (3) можно представить в случае с переменными коэффициентами в виде интегро-дифференциального уравнения относительно скорости смещений упругого пористого тела. В случае для малых значений пористости данное уравнение имеет вид [20]

$$u_{tt}(t, x) - c_t^2(t, x)u_{xx}(t, x) + \alpha_1(t, x)u_t(t, x) + \alpha_2(t, x)u_x(t, x) + \alpha_3(t, x)u(t, x) + \int_0^t \alpha_4(t - \tau, x)u(\tau, x)d\tau = f(t, x),$$

где коэффициенты  $\alpha_k(t, x)$  – заданные не обращающиеся в нуль ни в одной точке функции,  $f(t, x)$  – описывает источник.

### *Заключение*

Получена замкнутая одномерная система динамических интегро-дифференциальных уравнений первого порядка относительно компонент скоростей вектора смещений упругого пористого тела, насыщающей жидкости и тензора напряжений в диссипативном приближении. Математическая модель является термодинамически согласованной и в общем случае удовлетворяет первым физическим принципам. Распространение волн в насыщенной жидкостью пористой среде записывается одномерной системой уравнений через взаимосвязь компонент вектора скорости смещений и компонент тензора напряжений, используя принцип суперпозиции Больцмана в интегралах свертки с функциями последствия. Исследована зависимость дисперсионного соотношения полученной системы от физических и кинетических параметров.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Castagna J. P., Sun S., Wu S.R. Instantaneous spectral analysis: detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons // *The Leading Edge*. – 2003. – v. 22. – pp. 120–127.
2. Korneev V.A., Goloshubin G.M., Daley T.V., Silin D.B. Seismic low-frequency effects in monitoring of fluid-saturated reservoirs // *Geophysics*. – 2004. – v. 69. – pp. 522–532.
3. Френкель Я.И. К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений во влажной почве // *Изв. АН СССР. Сер. география и геофизика*. – 1944. – Т. 8. – №4. – С. 133–150.
4. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated Porous Solid I. // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1956. – Vol. 28. – pp. 168–178.
- 5 Biot, M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II: High-frequency range // *J. Acoust. Soc. America*. – 1956. – Vol. 28. – pp. 179–191.
6. Fellah, Z.E., Chapelon, J.Y., Berger, S., Lauriks, W., and C.D. Ultrasonic wave propagation in human cancellous bone: application of Biot theory // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2004. – No. 116. – pp. 61–73.
7. Carcione, J. M. Computational poroelasticity - A review // *Geophysics*. – 2010. – v. 75. – pp. 75A229–75A243.
8. Chiavassa, G. and Lombard, B. Time domain numerical modeling of wave propagation in 2D heterogeneous porous media // *J. Comp. Phys.* – 2011. – v. 230. – pp. 5288–5309.
9. Lu, J. F. and Hanyga, A. Wave field simulation for heterogeneous porous media with singular memory drag force // *J. Comp. Phys.* – 2005. – v. 208. – pp. 651–674.

10. Haddar, H., Li, J. R., and Matignon, D. Efficient solution of a wave equation with fractional-order dissipative terms // *J. Comp. Appl. Math.* – 2010. – v. 234. – pp. 2003–2010.
11. Blanc, E., Chiavassa, G., and Lombard, B. Biot-JKD model: simulation of 1D transient poroelastic waves with fractional derivatives // *J. Comput. Phys.* – 2012. – v. 237. – pp. 1–20.
12. Gautier, G., Groby, J. P., Dazel, O., Kelders, L., De Rick, L., and Leclaire, P. Propagation of acoustic waves in a one-dimensional macroscopically inhomogeneous poroelastic material // *J. Acoust. Soc. America.* – 2011. – v. 130. – pp.1390–1398.
13. Coussy, O. *Mechanics of Porous Continua*, John Wiley and Sons. – 1995.
14. Доровский В.Н., Перепечко Ю.В., Роменский Е.И. Волновые процессы в насыщенных пористых упругодеформируемых средах // *Физика горения и взрыва* - 1993. - No 1. - С. 100-111.
15. Blokhin A.M., Dorovsky V.N. *Mathematical modelling in the theory of multivelocitity continuum*, Nova Science, New York. – 1995.
16. Johnson D.L., Koplik J., Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media // *J. Fluid Mech.* – 1987. – v. 176. – pp. 379–402.
17. Имомназаров Х.Х., Имомназаров Ш.Х., Коробов П.В., Холмуродов А.Э. Прямая и обратная задача для нелинейных одномерных уравнений пороупругости // *Доклады Академии Наук.* – 2014. – том 455. – № 6. – С. 640-642.
18. Имомназаров Х.Х., Холмуродов А.Э. Моделирование и исследование прямых и обратных динамических задач пороупругости. Изд. Университет, Ташкент, 2017. – 120с.
19. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости, Мир, 1974
20. Yangiboev Z. The first Darboux problem for second order hyperbolic equations with memory // *Mathematical Modeling in Geophysics.* — 2015. — No. 18. — pp. 49-52.

## REFERENCES

1. Castagna, J. P., Sun, S., Wu, S.R. (2003). Instantaneous spectral analysis: detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*, 22, 120–127.
2. Korneev, V.A., Goloshubin, G.M., Daley, T.V., Silin, D.B. (2004). Seismic low-frequency effects in monitoring of fluid-saturated reservoirs. *Geophysics*, 69, 522–532.
3. Frenkel, Ya.I. (1944). On the theory of seismic and seismoelectric phenomena in a moist soil. *J. Phys. USSR*, 8, 230-241.
4. Biot, M.A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated Porous Solid I. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 28, 168–178.
- 5 Biot, M. A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II: High-frequency range. *J. Acoust. Soc. America* 28, 179–191.
6. Fellah, Z.E., Chapelon, J.Y., Berger, S., Lauriks, W., and C.D. (2004). Ultrasonic wave propagation in human cancellous bone: application of Biot theory. *J. Acoust. Soc. Am.* 116, 61–73.
7. Carcione, J. M. (2010). Computational poroelasticity - A review, *Geophysics* 75, 75A229–75A243.
8. Chiavassa, G. and Lombard, B. (2011). Time domain numerical modeling of wave propagation in 2D heterogeneous porous media, *J. Comp. Phys.* 230, 5288–5309.
9. Lu, J. F. and Hanyga, A. (2005). Wave field simulation for heterogeneous porous media with singular memory drag force. *J. Comp. Phys.* 208, 651–674.
10. Haddar, H., Li, J. R., and Matignon, D. (2010). Efficient solution of a wave equation with fractional-order dissipative terms. *J. Comp. Appl. Math.* 234, 2003–2010.
11. Blanc, E., Chiavassa, G., and Lombard, B. (2012). Biot-JKD model: simulation of 1D transient poroelastic waves with fractional derivatives. *J. Comput. Phys.* 237, 1–20.
12. Gautier, G., Groby, J. P., Dazel, O., Kelders, L., De Rick, L., and Leclaire, P. (2011). Propagation of acoustic waves in a one-dimensional macroscopically inhomogeneous poroelastic material. *J. Acoust. Soc. America.* 130, 1390–1398.
13. Coussy, O. (1995). *Mechanics of Porous Continua*, John Wiley and Sons.

14. Dorovsky, V.N., Perepechko, Yu.V., Romensky, E.I. (1993). Wave processes in saturated porous elastically deformed media. *Comb., Expl. and Shock Waves*, 1, 93-103.
15. Blokhin, A.M., Dorovsky, V.N. (1995). *Mathematical modelling in the theory of multivelocity continuum*, Nova Science, New York.
16. Johnson, D.L., Koplik, J., Dashen, R. (1987). Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J. Fluid Mech.*, 176, 379–402.
17. Imomnazarov, Kh.Kh., Imomnazarov, Sh.Kh., Korobov, P.V., Kholmurodov, A.E. (2014). Direct and inverse problem for the nonlinear one-dimensional poroelasticity equations. In *Doklady Akademii Nauk [Journal of Doklady Mathematics]*, 455(6), 640–642 [in Russian].
18. Imomnazarov, Kh.Kh., Kholmursdov, A.E. (2017). *Modelirovanie i issledovanie pryamikh i obratnikh dinamicheskikh zadach porouprugosti [Modeling and investigation of direct and inverse dynamic problems of poroelasticity]*. Tashkent: Tashkent University [in Russian].
19. Chistensen, R. (1971). *Theory of Viscoelasticity*, Academic Press, New York.
20. Yangiboev, Z. (2015). The first Darboux problem for second order hyperbolic equations with memory. *Mathematical Modeling in Geophysics*. 18, 49-52.

© X. X. Имомназаров, P. K. Юсупов, 2018

## **АЛГОРИТМ И ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХМЕРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

*Дмитрий Алексеевич Караваяев*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sccc.ru

Представлен алгоритм численного моделирования распространения упругих волн в двухмерных неоднородных изотропных упругих средах. Разработана и предложена параллельная реализация для возможности проведения расчетов на высокопроизводительных вычислительных системах с различной архитектурой. Разработаны программы для проведения расчетов на основе конечно-разностного метода четвертого порядка аппроксимации по пространству. Представленная технология математического моделирования с использованием MPI и CUDA применена для расчета реалистичной модели по сейсмическому профилю на 400 км. Представлены синтетические данные о структуре сейсмического поля для Байкальской рифтовой зоны.

**Ключевые слова:** параллельный алгоритм, программа, сейсмические волны, большие расстояния, численное моделирование, реалистичные модели.

## **ALGORITHM AND PROGRAMM CODES FOR 2D SEISMIC FIELD SIMULATION AND COMPUTATION, AND THEIR PRACTICAL APPLICATION**

*Dmitry A. Karavaev*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sccc.ru

An algorithm for simulation of elastic wave propagation in 2D inhomogeneous isotropic elastic media is presented. The parallel realization of algorithm to perform computations on high-performance computing systems with different architectures is developed and proposed. Program codes to perform calculations on the basis of finite-difference method of fourth order respect to space were developed. The presented technology of mathematical modeling with usage of MPI and CUDA is used to perform computations for long distance realistic model for seismic profile of 400 km of size. The obtained new synthetic data depicting the structure of seismic field for the Baikal rift zone are presented.

**Key words:** parallel algorithm, program code, seismic waves, numerical simulation, realistic models.

### ***Введение***

Теоретические и экспериментальные исследования распространения сейсмических волн в неоднородных средах со сложной геометрией строения на большие расстояния являются весьма актуальными [1-3]. В работе основным объектом для изучения выступает модель Байкальской рифтовой зоны [4]. Такой объект интересен тем, что известны несколько геофизических моделей, какими их представляют геологи. Проведение математического моделирования распространения упругих волн в такой неоднородной среде позволит получить

новые знания о его строении и возможно поможет уточнить строение модели. Такое исследование возможно при проведении сравнения экспериментальных и синтетических результатов.

Разработка алгоритма, его параллельной реализации и программного обеспечения вызвана необходимостью проведения расчетов по профилю на расстоянии сотни километров. В этой связи важными задачами выступают поиск и разработка математического метода с порядком точности, обеспечивающим приемлемую точность вычислений. В настоящее время существуют разнообразные математических методов, которые применимы для решения динамической задачи теории упругости. Это могут быть интегральные, конечно-разностные методы, методы конечных элементов [5-9].

Современные задачи в области численного моделирования, связанные с расчётами и сеточными методами как правило являются весьма трудоемкими. В таких задачах исследователь сталкивается с необходимостью работы с большими объемами данных. В таких условиях становится необходимым разработка параллельных алгоритмов и применение для расчетов высокопроизводительных многоядерных вычислительных систем различной архитектуры [10-15]. Такие системы при правильном и эффективном использовании вычислительных ресурсов [16-18] на основе параллельных алгоритмов позволяют проводить исследования для реалистичных моделей с подробной детализацией. Необходимость проведения расчетов на кластерах объясняется тем, что речь идет о работе с десятками и сотнями Гб данных.

В работе представлена технология проведения математического моделирования для расчета полного волнового поля для неоднородных упругих сред. Выбран конечно-разностный метод четвертого порядка аппроксимации. Для исключения отражений волн от границ расчетной области применен алгоритм PML (Perfectly Matched Layers) [19-24]. Для выбранного метода предложено распараллеливание численного алгоритма. На основе параллельного алгоритма разработано программное обеспечение для кластеров с различной архитектурой. Речь идет об использовании в расчетах центральных процессоров, графических процессоров. Предложенная параллельная реализация легко адаптируется к использованию различных вычислительных устройств. На основе разработанных программ проведена работа по восстановлению структуры сеточной модели и определения значений упругих параметров для проведения численного моделирования сейсмического поля рифтовой зоны. В данной работе впервые получены и представлены результаты моделирования полного волнового поля для Байкальской рифтовой зоны, которые не имеют аналогов.

### *Постановка задачи*

В работе рассматривается решение прямой задачи геофизики численного моделирования полного волнового поля для изотропного случая неоднородных упругих сред. Для решения задачи используется система уравнений теории упругости (1), записанная в терминах скоростей перемещений  $u, w$  и напряжений

$\tau_{xx}, \tau_{zz}, \tau_{xz}$ . Решение ищется в двумерной прямоугольной системе координат  $(x, z)$ . Область моделирования представляет собой прямоугольник, верхняя граница которого ( $z=0$ ) является свободной поверхностью, рис. 1.

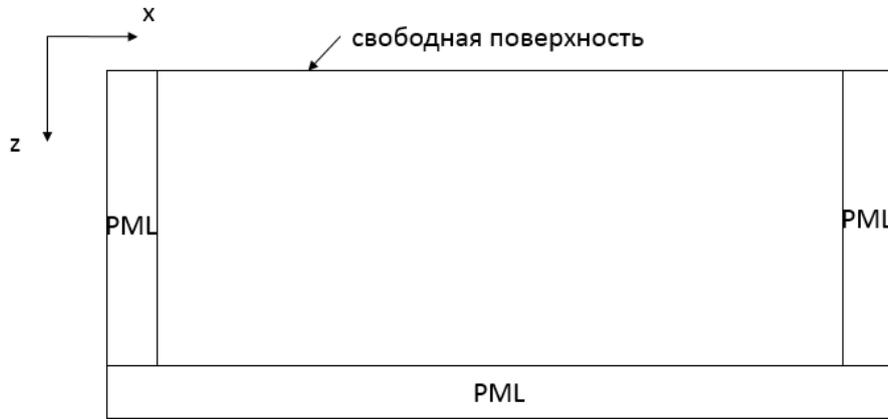


Рис. 1. Схематическое представление 2D области моделирования

Упругая среда характеризуется тремя параметрами: плотностью  $\rho$ , скоростями продольных и поперечных волн  $V_p$  и  $V_s$ . Геометрия строения внутренней части прямоугольной области определяется распределением значений представленных упругих характеристик. Отметим, что в системе уравнений теории упругости эти характеристики входят как параметры Ламе. Эти параметры являются двумерными функциями координат и определяются пользователем до начала расчетов волнового поля.

$$\begin{aligned}
 \rho u_t &= \tau_{xx,x} + \tau_{xz,z} \quad , \\
 \rho w_t &= \tau_{xz,x} + \tau_{zz,z} \quad , \\
 \tau_{xx,t} &= (\lambda + 2\mu)u_x + \mu w_z + f_x \quad , \\
 \tau_{zz,t} &= \mu w_x + (\lambda + 2\mu)u_z + f_z \quad , \\
 \tau_{xz,t} &= \mu(u_z + w_x)
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $u_t = \frac{\partial u}{\partial t}$ ,  $\tau_{ij,j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$ ,  $x_1 = x, x_2 = z$

Задача решается при соответствующих нулевых граничных и начальных условиях.

Частью успешного решения является применение метода PML в одной из его реализаций для исключения нежелательных отражений упругих волн от границ расчетной области, которые могли бы внести изменения в интересующую картину сейсмического поля внутри области моделирования [25, 26]. Для этого вдоль боковых границ и вдоль нижней границы выделены прямо-

угольные подобласти малого размера, в которых и реализуются расчетные формулы метода PML, рис. 1.

Для проведения расчетов и генерации сейсмических волн используется точечный источник, который может быть реализован как «всесторонняя сила», находясь внутри области моделирования исключая PML слои, или как «вертикальная сила», располагаясь на свободной поверхности.

### Метод решения

При выборе метода решения было важно, чтобы он обладал хорошей гибкостью и потенциалом для разработки параллельного алгоритма. Также метод должен обеспечивать достаточную точность вычислений на больших расстояниях. В этой связи был выбран конечно-разностный метод четвертого порядка точности по пространству [27] с уравнениями для реализации граничных условий на свободной поверхности [28]. Конечно-разностная схема для расчета P-SV волн имеет общий вид (2):

$$\tau_{xx,i,j}^{n+1} = \tau_{xx,i,j}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} ((\lambda + 2\mu)_{i,j} [A(u_{i+\frac{3}{2},j}^n - u_{i-\frac{3}{2},j}^n) + B(u_{i+\frac{1}{2},j}^n - u_{i-\frac{1}{2},j}^n)]) + \lambda_{i,j} [A(w_{i+\frac{3}{2},j}^n - w_{i-\frac{3}{2},j}^n) + B(w_{i+\frac{1}{2},j}^n - w_{i-\frac{1}{2},j}^n) + f_x^{n+1}]), A = -\frac{1}{24}, B = \frac{9}{8} \quad (2)$$

где  $i, j$ - сеточные координаты,  $n, n+1$ - временные слои,  $\Delta t, \Delta x$  - шаг расчетной сетки по времени и пространству соответственно.

Схема реализована на смещенных сетках [28], что отражается на своеобразном размещении компонент вектора скоростей смещений и компонент тензора напряжений относительно выбранного узла сеточной модели, рис. 2.

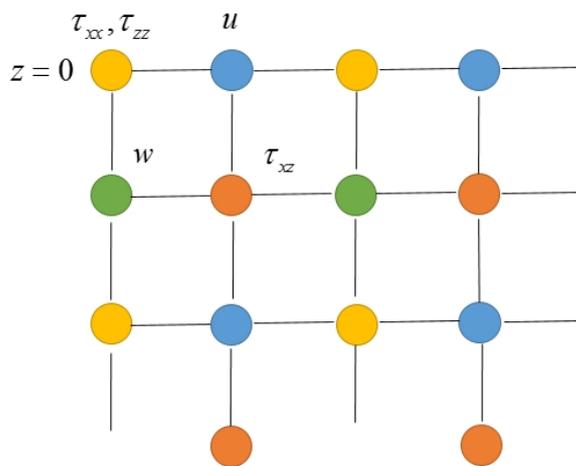


Рис. 2. Схема на смещенных сетках для 2D случая.  
 $u, w$  - скорости перемещений,  $\tau_{xx}, \tau_{zz}, \tau_{xz}$  - напряжения

Для данной работы расположение выбрано таким образом, что на свободной поверхности находятся компоненты  $\tau_{xx}, \tau_{zz}, u$ . В работе рассматриваются сеточные модели только с одинаковыми шагами по пространственным переменным  $\Delta x = \Delta z$ .

### *Программная реализация*

Для данной работы разработаны несколько программных реализаций на основе параллельного алгоритма. Для проведения расчетов применяются кластеры на основе многоядерных CPU (Central Processing Unit) и на основе специализированных вычислительных устройств типа GPU (Graphics Processing Unit). Выбран простейший способ организации параллельных вычислений на основе разбиения по данным. Таким образом область моделирования представляется как набор горизонтальных слоев, выбран способ одномерной декомпозиции по оси Oz. Каждый слой обрабатывается независимо на выделенном вычислительном устройстве. Разработанная параллельная реализация алгоритма легко адаптируется для использования в расчетах CPU или GPU. Таким образом программа состоит из нескольких частей. Первая часть реализует организацию параллельных вычислений, выделение процессов, создание топологии, в данном случае «линейка», интерфейс взаимодействия между вычислительными устройствами, организацию пересылок данных, ожидание выполнения операций и их проверку. Все это реализовано с использованием технологии MPI (Message Passing Interface). Вторая часть программы реализует процедуры расчета, которые могут быть распараллелены с использованием OpenMP (Open Multi-Processing) или технологии CUDA (Compute Unified Device Architecture) [29]. Поскольку CUDA в основном оперирует с одномерными массивами данных при реализации распараллеливания, то в разработанных программах было реализована конвертация двухмерных массивов в одномерные. Также при разработке программ следует учитывать возможности вычислительного устройства для оптимального выбора параметров при распараллеливании. Под этим подразумевается количество доступных вычислительных ядер на многопроцессорном вычислительном устройстве или графической карте. В данной работе не применялись специализированные математические библиотеки или другие возможности и распараллеливание осуществлялось разбиением двухмерных или одномерных циклов «for» при обходе 1D границ или 2D точек слоев. Отметим, что программа расчетов реализована с применением неблокированных функций обмена данными по MPI. Такая организация позволит выполнить пересылки за то время, что происходит расчет внутренней двухмерной части каждого из слоев. Таким образом вычислительные процедуры представлены несколькими типами: одни - для расчета точек внутри слоя на основе 2D процедур, другие – для расчета точек на смежных границах соседних слоев. Поэтому и распараллеливание применяется либо по двум координатам, либо только по одной координате. В случае использования в расчетах GPU не стоит забывать о необходимости копирования данных между CPU и GPU, которые реализуются с использованием специализированных буферов данных, инициализированных как на управляющем

CPU, так и на вычислительном устройстве GPU. Более подробно о таком способе организации вычислений можно ознакомиться в работе [30], где аналогичная технология применялась для решения динамической задачи теории упругости для трехмерного варианта на основе конечно-разностного метода второго порядка аппроксимации. В отличие от параллельного алгоритма для разностной схемы второго порядка в реализации для схемы четвертого порядка необходимо передавать по два слоя точек вдоль оси Oz «сверху» и «снизу» каждого слоя, исключая самый верхний и самый нижний в топологии, рис. 3.

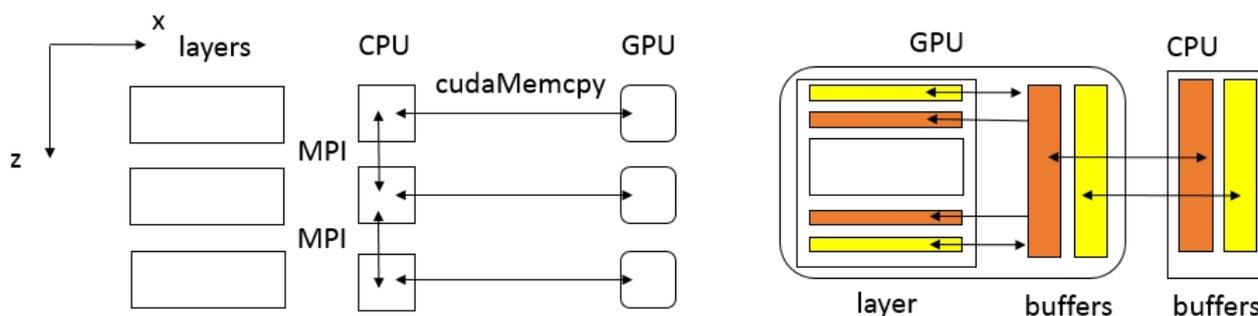


Рис. 3. Схематическое представление организации параллельных вычислений для предложенного алгоритма

### *Расчеты и результаты*

Разработанная технология математического моделирования и созданные программы предназначены для возможности расчетов сейсмического поля на большие расстояния. Это связано с исследованием строения и определением значений упругих параметров для Байкальской рифтовой зоны. Такой объект характеризуется большой протяженностью. Для подготовки сеточной модели использовались данные, которые содержат информацию о значениях скоростей упругих волн и плотности на выделенных горизонтах. Было проведено восстановление распределения значений упругих параметров на расчетной сетке на основе разработанной программы для создания моделей упругих сред. В такой программе применяется алгоритм сплайн интерполяции. Результатом работы стало восстановление трех массивов данных для проведения расчетов и определения значений  $\lambda$  и  $\mu$ . Область моделирования составила 400 км по оси Oх и 73 км по оси Oz, рис. 4. Для восстановления использовано более 10 опорных точек (скважинных данных).

Для расчета сейсмического поля в программе использовался источник типа «вертикальная сила» с частотой 7 Гц. Координаты расположения источника  $\sim 15$  км по оси Oх. Расчетная сетка включала 56743 x 10356 точек. Размер одного выходного файла с результатами в виде снимка волнового поля составил более 2 Гб. Расчет проведен на кластере НКС-30Т Центра коллективного пользования Сибирского суперкомпьютерного центра (<http://www.sccc.icmmg.nsc.ru>). Для расчетов применена программа на основе работы с CPU и MPI. В расчетах

использовано 12 вычислительных узлов по 12 ядер. На каждое ядро выделено по одному MPI процессу.

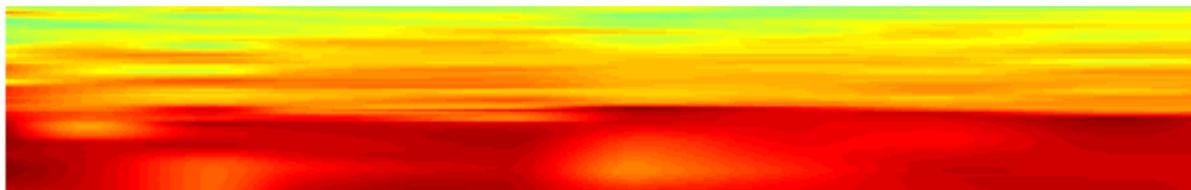


Рис. 4. Геометрическое строение модели Байкальской рифтовой зоны на основе скважинных данных. Рисунок создан по распределению значений скорости S волн на расчетной сетке

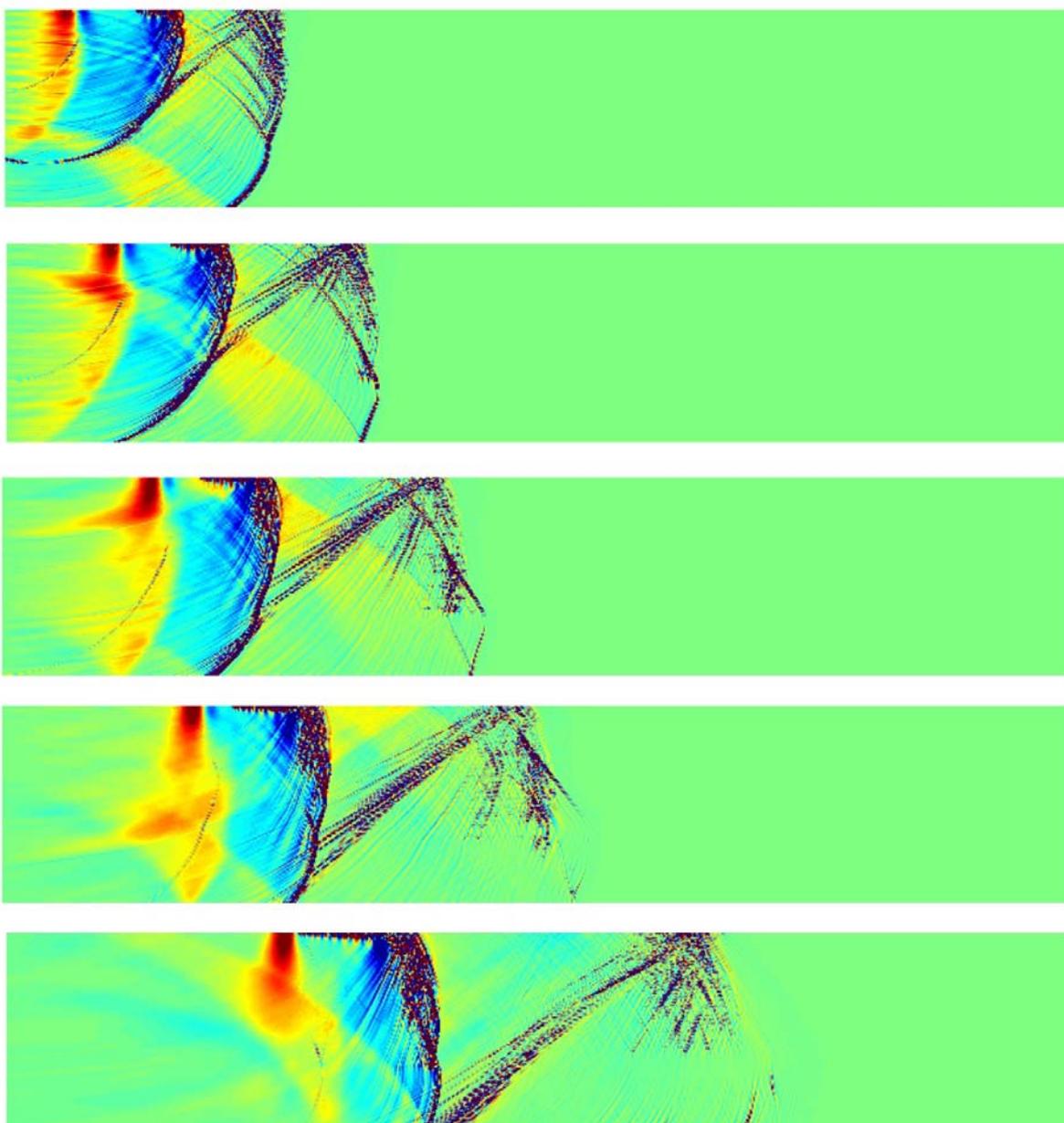


Рис. 5. Снимки вертикальной компоненты сейсмического поля рифтовой зоны для времен расчета: 15, 20, 25, 30, 40 секунд (сверху-вниз)

## Заключение

Предложен алгоритм решения динамической задачи теории упругости для моделирования полного поля сейсмических волн от точечного источника. Предложена параллельная реализация конечно-разностного метода для численных экспериментов. По результатам работы разработана технология математического моделирования и программы для проведения расчетов на высокопроизводительных вычислительных системах с вычислительными устройствами CPU и GPU. С использованием разработанных программ подготовлена геофизическая модель строения Байкальской рифтовой зоны для расстояний на сотни километров. Для восстановления структуры и распределения упругих параметров на сеточной модели использовались скважинные данные, содержащие информацию о значениях на выделенных горизонтах. Для подготовленной модели выполнено математическое моделирование процессов распространения сейсмических волн для профиля на 400 км. Для данного объекта исследований получены синтетические данные в виде сейсмограмм и снимков волнового поля. С использованием полученных результатов возможно провести исследовательскую работу по сопоставлению синтетических и экспериментальных данных, что позволит уточнить и скорректировать геофизическую модель.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 16-07-01052, 17-07-00872).*

## REFERENCES

1. Maeda T., Takemura S. and Furumura T. (2017). OpenSWPC: an open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media. *Earth, Planets and Space* 69:102 DOI 10.1186/s40623-017-0687-2, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s40623-017-0687-2.pdf>.
2. Komatitsch, D., et al. (2010). High-order finite-element seismic wave propagation modeling with MPI on a large GPU cluster. *J. Comput. Phys.* 229(20), 7692–7714.
3. Aochi H., Ulrich T., Ducellier A., Dupros F., Michéa D. (2012) Finite difference simulations of seismic wave propagation for understanding earthquake physics and predicting ground motions: Advances and challenges. *Conference on Computational Physics*. <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00726430/document>.
4. Mordvinova V.V., Artemiev A.A. (2010). The three-dimensional shear velocity structure of lithosphere in the southern Baikal rift system and its surroundings. *Russian Geology and Geophysics*, Vol. 51, No. 6, pp. 694-707.
5. O'Reilly O., Lundquist T., M.Dunhama E., Nordström J. (2017). Energy stable and high-order-accurate finite difference methods on staggered grids *Journal of Computational Physics* 346 572–589.
6. Solano P. C.A., Donno D., Chauris H. (2016). Finite-difference strategy for elastic wave modelling on curved staggered grids, *Comput. Geosci.* 20(1) 245–264, <http://dx.doi.org/10.1007/s10596-016-9561-8>.
7. O'Reilly O., Nordström J., Kozdon J.E., Dunham E.M. (2015). Simulation of earthquake rupture dynamics in complex geometries using coupled finite difference and finite volume methods, *J. Commun. Phys.* 17(2) 337–370, <http://dx.doi.org/10.4208/cicp.111013.120914a>.

8. Ren Z., Liu Y. (2015) Acoustic and elastic modeling by optimal time-space-domain staggered-grid finite-difference schemes, *Geophysics*, 80(1), T17–T40.
9. Yong P., Huang J., Li Z., Liao W., Qu L., Li Q., Liu P. (2017). Optimized Equivalent Staggered-grid FD Method for Elastic Wave Modeling Based on Plane Wave Solutions, *Geophysical Journal International*, Volume 208, Issue 2, pp. 1157–1172.
10. Heinecke A., Breuer A., Bader M., Dubey P. (2016). High Order Seismic Simulations on the Intel Xeon Phi Processor (Knights Landing). *High Performance Computing*, pp 343-362.
11. Tobin J., Breuer A., Heinecke A., Yount C., Cui Y. (2017) Accelerating Seismic Simulations Using the Intel Xeon Phi Knights Landing Processor. In: Kunkel J., Yokota R., Balaji P., Keyes D. (eds) *High Performance Computing. ISC 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10266. Springer. pp 139-157.
12. Li Y., Métivier L., Brossier R., Han B. and Virieux J. (2015). 2D and 3D frequency-domain elastic wave modeling in complex media with a parallel iterative solver *Geophysics*, Vol. 80, No. 3; P. T101–T118.
13. Chan J., Wang J., Modave A., Remacle J.-F., and Warburton T. (2016). GPU-accelerated discontinuous Galerkin methods on hybrid meshes. *Journal of Computational Physics* Volume 318, Pages 142-168.
14. Castro M., Francesquini E., Dupros F., Aochi H., Navaux P., et al. (2016). Seismic Wave Propagation Simulations on Low-power and Performance-centric Manycores. *Parallel Computing*, Elsevier, Volume 54, Pages 108-120.
15. Qawasmeh A., Chapman B., Hugues M., Calandra H. (2015). GPU Technology Applied to Reverse Time Migration and Seismic Modeling via OpenACC. *Proceeding PMAM '15 Proceedings of the Sixth International Workshop on Programming Models and Applications for Multicores and Manycores* Pages 75-85.
16. Iturrarán-Viveros U. and Molero-Armenta M. (2015). GPU computing with OpenCL to model 2D elastic wave propagation: exploring memory usage *Comput. Sci. Disc.* 8.
17. Hamilton B., Webb C. J., Gray A., Bilbao S. (2015). Large Stencil Operations for GPU-based 3-D Acoustics Simulations *Proc. of the 18th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-15)*, [https://www.ntnu.edu/documents/1001201110/1266017954/DAFx-15\\_submission\\_46.pdf](https://www.ntnu.edu/documents/1001201110/1266017954/DAFx-15_submission_46.pdf).
18. Darmawan J. B. B. and Mungkasi S. (2017). Performance of parallel computation using CUDA for solving the one-dimensional elasticity equations *J. Phys.: Conf. Ser.* 801 012080, doi:10.1088/1742-6596/801/1/012080, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/801/1/012080/pdf>.
19. Assi H., Cobbold R. S. (2016). A second-order, perfectly matched layer formulation to model 3D transient wave propagation in anisotropic elastic media. *The Journal of the Acoustical Society of America* 140, 3261 <https://doi.org/10.1121/1.4970329>.
20. Lee and C. Shin. (2015). Time-domain formulation of a perfectly matched layer for the second-order elastic wave equation with VTI media. *J. Seism. Explor*, vol. 40, pp. 231-257.
21. Xie Z., Matzen R., Cristini P., Komatitsch D., and Martin R. (2016). A perfectly matched layer for uid-solid problems: Application to ocean-acoustics simulations with solid ocean bottoms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1):165-175.
22. Bérenger J.-P. (1994). A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Comp. Phys.* 114, 185-200.
23. Collino F. and C. Tsogka. (1998). Application of the PML absorbing layer model to the linear elastodynamic problem in anisotropic heterogeneous media. *INRIA, Rapport de recherche*, n. 3471.
24. Chew W. C. and Q. H. Liu. (1996). Perfectly matched layers for elastodynamics: a new absorbing boundary condition. *J. Comp. Acoustics* 4, 341-359.
25. Komatitsch, D. and J. Tromp. (2003). A Perfectly Matched Layer (PML) absorbing condition for the second-order elastic wave equation. *Geophys. J. Int.* 154, 146-153.
26. Komatitsch D., Martin R. (2007). An unsplit convolutional Perfectly Matched Layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation. *Geophysics*, vol. 72, pp. 155-167.

27. Levander A. (1988). Fourth-order finite difference P-SV seismograms, *Geophysics* 53, 1425–1436.
28. Moczo P. (1998). Introduction to Modeling Seismic Wave Propagation by the Finite-Difference Method. Lecture Notes, Kyoto University, [ftp://www.nuquake.eu/pub/Papers/Moczo\\_LN\\_Kyoto\\_1998.pdf](ftp://www.nuquake.eu/pub/Papers/Moczo_LN_Kyoto_1998.pdf).
29. CUDA C Programming Guide. (2017). <http://hpc.pku.edu.cn/docs/20170829223400085039.pdf>.
30. Karavaev D.A., Glinsky B.M., Kovalevsky V.V. (2015). A Technology of 3D Elastic Wave Propagation Simulation Using Hybrid Supercomputers. CEUR Workshop Proceedings 1<sup>st</sup> Russian Conference on Supercomputing Days, Vol. 1482, pp. 26-33.

© Д. А. Каравеев, 2018

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВУЛКАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

### ***Валерий Николаевич Мартынов***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-60-46, e-mail: vnm@nmsf.sccc.ru

### ***Борис Михайлович Глинский***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-62-79, e-mail: gbm@sscc.ru

### ***Дмитрий Алексеевич Караваев***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sccc.ru

### ***Анна Федоровна Сапетина***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, аспирант, тел. (913)756-97-88, e-mail: afsapetina@gmail.com

В статье обсуждается возможность мониторинга вулканических структур на основе математического моделирования грязевого вулкана Гора Карabetова и стратовулкана Эльбрус. Формулируются подходы к математическому моделированию вулканических структур грязевого и магматического типов. Приводится описание математических постановок динамической теории упругости, метод решения, основанный на конечно-разностных схемах на сдвинутых сетках и методе поглощающих границ вида PML. Разработаны программные комплексы для проведения численных экспериментов. Построены геофизические модели этих вулканов. Приводятся некоторые результаты численных экспериментов. На основании проведенных исследований делается вывод о возможности мониторинга вулканов этих типов с применением прецизионных вибросейсмических источников и сейсмических систем наблюдений.

**Ключевые слова:** мониторинг, 3D-моделирование, вулканические структуры, упругие волны, конечно-разностные схемы, гибридный кластер, GPU.

## **SIMULATION OF VOLCANIC STRUCTURES VIBROSEISMIC MONITORING**

### ***Valery N. Martynov***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-60-46, e-mail: vnm@nmsf.sccc.ru

### ***Boris M. Glinsky***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-62-79, e-mail: gbm@sscc.ru

***Dmitry A. Karavaev***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sccc.ru

***Anna F. Sapetina***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, phone: (913)756-97-88, e-mail: afsapetina@gmail.com

In this paper, the possibility of volcanic structures monitoring based on mathematical modeling is discussed. This study deals with the Mt. Karabetov mud volcano and the Elbrus stratovolcano. Approaches to the mathematical modeling of the volcanic structures of mud and magmatic types are formulated. The mathematical description of the dynamic elasticity theory is described. The solution method is based on the use of finite-difference schemes designed with application of staggered grids and a method of absorbing boundaries. The software for carrying out numerical experiments has been developed. Geophysical models of such volcanoes has been designed. The results of numerical experiments of modeling full seismic field are presented. Based on the conducted studies, it may be concluded that monitoring of the presented types of volcanoes using vibroseismic sources and seismic observation systems is possible.

**Key words:** monitoring, 3D simulation, volcanic structures, elastic waves, finite-difference schemes, parallel algorithms, hybrid cluster, GPU.

***Введение***

Вулканы, в том числе и спящие, являются потенциальной угрозой внезапного возникновения мощных катастрофических явлений. Возможность предсказать заранее приближающееся извержение позволила бы сохранить жизни людей и их имущество. Для этого необходимо проводить мониторинг состояния вулкана, отслеживать изменения параметров внутренней среды, их вариации, и делать по ним прогноз извержений. Последнее требует предварительного тщательного комплексного исследования процессов, проходящих внутри вулканов и на их поверхности. Одним из инструментов для проведения такого исследования является активный вибросейсмический мониторинг [1,2]. Получаемая в его ходе информация сложна для интерпретации и требует проведения предварительного и сопутствующего математического моделирования процессов, происходящих внутри исследуемого геофизического объекта с учетом особенностей его строения [3-5]. Обычно рельеф исследуемого объекта достаточно сложен и не позволяет расположить на нем систему наблюдения, достаточную для сбора информации для решения обратной задачи. В связи с этим приходится многократно решать прямую задачу, варьируя параметры моделируемой среды так, чтобы результаты численного и натурного экспериментов качественно совпадали. Такой подход позволяет рассмотреть возможные типы строения магматических [6,7] и грязевых [8-10] вулканов и их различные состояния, чтобы выделить основные эффекты, возникающие в данных, фиксируемых системой наблюдения на поверхности вулкана (сейс-

мограммы), для облегчения их интерпретации при непосредственном мониторинге [11].

Таким образом, мы сталкиваемся с проблемой проведения крупномасштабного численного моделирования процессов распространения упругих волн для вулканических структур различного строения при вибросейсмическом мониторинге. Решение такой задачи требует использования новейших суперкомпьютерных технологий [12-14]. Особо следует отметить современные подходы, опирающиеся на понятие со-дизайна. Под этим в контексте математического моделирования физических процессов понимается построение физико-математической модели явления, численного метода, параллельного алгоритма и его программной реализации, эффективно использующей архитектуру суперкомпьютера [15].

### Постановка задачи

Распространение сейсмических волн в упругих неоднородных средах описывается системой уравнений теории упругости с соответствующими начальными и граничными условиями. Постановку этой задачи можно представить в терминах вектора скоростей смещения  $\vec{u} = (U, V, W)^T$  и тензора напряжения  $\vec{\sigma} = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz})^T$  следующим образом:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = [A] \vec{\sigma} + \vec{F}(t, x, y, z), \quad \frac{\partial \vec{\sigma}}{\partial t} = [B] \vec{u}, \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial x} & \lambda \frac{\partial}{\partial y} & \lambda \frac{\partial}{\partial z} \\ \lambda \frac{\partial}{\partial x} & (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial y} & \lambda \frac{\partial}{\partial z} \\ \lambda \frac{\partial}{\partial x} & \lambda \frac{\partial}{\partial y} & (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial z} \\ \mu \frac{\partial}{\partial y} & \mu \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ \mu \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \mu \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \mu \frac{\partial}{\partial z} & \mu \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix},$$

где  $t$  — время,  $\rho(x, y, z)$  — плотность,  $\lambda(x, y, z)$ ,  $\mu(x, y, z)$  — параметры Ламе.

Начальные и граничные условия на свободной поверхности условия имеют вид:

$$\vec{\sigma}|_{t=0} = 0, \quad \vec{u}|_{t=0} = 0, \quad \sigma_{xz}|_{z=0} = 0, \quad \sigma_{yz}|_{z=0} = 0, \quad \sigma_{zz}|_{z=0} = 0. \quad (2)$$

Рассматривается 3D изотропная неоднородная упругая среда со сложной геометрией. Расчетная область представляет собой параллелепипед. На плоскости  $z=0$  реализуются граничные условия для свободной поверхности (2).

Для численного решения поставленной задачи (1)–(2) применяются известные конечно-разностные схемы на сдвинутых сетках [16], хорошо себя зарекомендовавшие для решения системы уравнений динамической теории упругости, записанной в терминах скоростей смещения и напряжений. Расчет упругих параметров, входящих в уравнения (1)–(2) осуществляется на основе интегральных законов сохранения. Используются схемы 2-го порядка аппроксимации по времени и 2-го и 4-го порядка аппроксимации по пространству. Подробное описание разностных схем для данной задачи приведено в статьях [17-20].

При реализации этого метода используется метод поглощающих границ. Для этого граница расчетной области, за исключением свободной поверхности, окружается поглощающими слоями. Поглощающие слои окружают все грани параллелепипеда за исключением свободной поверхности. В этих слоях в исходные конечно-разностные уравнения вводятся члены с демпфирующими параметрами. В точках, не попадающих в эти зоны, расчет производится по первоначальной схеме. Подробное представление предложенного метода организации поглощающих зон для численных экспериментов представлено в работе [21].

### *Программная реализация*

Для построения математической модели структуры, характерной для грязевых и магматических вулканов, разработана программа, конструирующая 2D и 3D модели упругих сред, приближенные к реальным средам [18].

На основе описанных методов создан комплекс программ для разных вычислительных архитектур. А именно, разработаны:

- о программы численно решающие 3D задачу динамической теории упругости в скоростях смещения и напряжениях для кластера с классической массивно-параллельной архитектурой и для гибридного кластера, оснащенного графическими ускорителями;

- о программа численно решающая 3D задачу динамической теории упругости в смещениях для гибридного кластера, оснащенного графическими ускорителями;

- о программа численно решающая 2D задачу динамической теории упругости в скоростях смещения и напряжениях для одного узла гибридного кластера с тремя графическими ускорителями.

Последняя реализация позволяет одновременно проводить до 40 различных вариантов расчетов на кластере НКС-30Т+GPU всего за несколько минут. Это позволяет быстро подобрать кинематические характеристики изучаемой среды.

## Результаты численных экспериментов

Данный подход применяется для моделирования грязевого вулкана Гора Карabetова [22-24] и магматического вулкана Эльбрус. Для сравнения динамических и кинематических характеристик расчетных и наблюдаемых сейсмических полей при вибросейсмическом мониторинге верхней части вулкана Карabetова гора, разработана его математическая 3D модель и проведены численные эксперименты [17,18].

В результате серии экспериментов при варьировании геометрии и значений упругих параметров была разработана 3D модель, наилучшим образом сопоставимая с результатами геофизического эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Значения упругих параметров грязевого вулкана Карabetова гора

	$V_p$ , км/с	$V_s$ , км/с	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>		$V_p$ , км/с	$V_s$ , км/с	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Слой 1	1.7	0.68	2.55	Слой 4	2.6	1.25	2.8
Слой 2	2.2	1.1	2.9	Слой 5	2.5	1.25	3.0
Слой 3	2.5	1.4	2.7	Цилиндр, Конус	1.3	0.81	1.2

Разработанная модель вулкана Карabetова гора состоит из пяти слоев с коническим и цилиндрическим включением, которые представляют собой антиклинальную структуру и соответствуют центральному флюидозаполненному каналу вулкана. При моделировании использовался, расположенный вблизи свободной поверхности, источник типа «центр давления» с несущей частотой 25 Гц. Сейсмоприемники располагались вдоль профиля А-А1 (рис. 1, слева), регистраторы с сейсмоприемниками располагаются на свободной поверхности. Такое расположение соответствует схеме проведенного натурального эксперимента [17]. Численное моделирование проведено на кластере НКС-30Т Сибирского суперкомпьютерного центра (ССКЦ СО РАН). Количество используемых ядер (MPI процессов) составляло 160. Время, затраченное на моделирование около 20 часов.

На мгновенных снимках волнового поля в последовательные моменты времени (рис. 2) показан процесс прохождения прямой волны через область вулкана. Волновая картина включает прямую волну и волны, отраженные от слоев и канала вулкана. Снимки иллюстрируют процесс резонансного возбуждения волн в канале и их медленного затухания после ухода из зоны канала прямых и отраженных волн. Геометрия и акустическая контрастность относительно вмещающих слоев определяют резонансный характер возбуждаемого в вулканическом канале волнового поля.

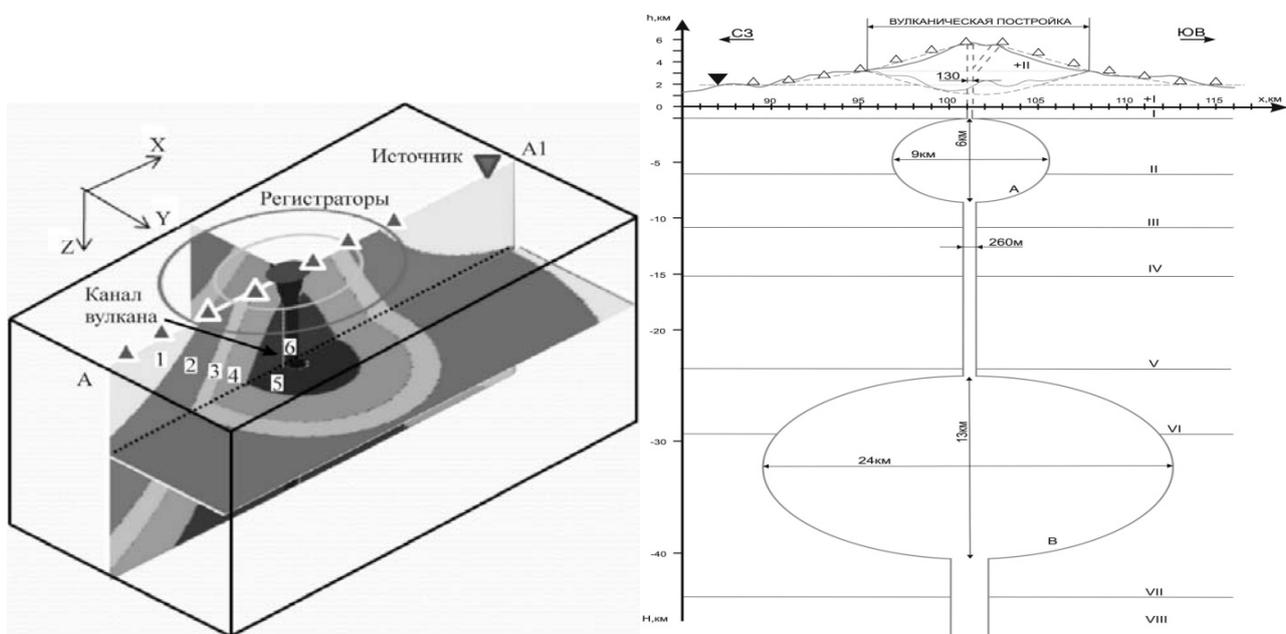


Рис. 1. Вид 3D модели верхней части грязевого вулкана Карабетова гора (слева), приближенная геофизическая модель вулкана Эльбрус (справа)



Рис. 2. Вертикальные компоненты волнового поля в последовательные моменты времени по профилю А-А1 (рис. 1). Линиями отмечены границы слоев антиклинальной структуры вулкана и центрального канала

Приближенная модель вулкана Эльбрус (рис. 1, справа) представлена многослойной средой с эллиптическими и цилиндрическими с параметрами, указанными в табл. 2. Подробное описание геофизической модели можно найти в [19]. Вулканическая постройка лежит на гранитном блоке +I; эффузивные породы, слагают вулканический конус +II; ниже нулевой отметки можно выделить 8 слоев. Магматические очаги представлены в виде эллипсоидов, верхний очаг с горизонтальными и вертикальными осям 9 и 6 км ( $\rho=2.1 \text{ г/см}^3$ ;  $Vp=2.2 \text{ км/с}$ ), материнский магматический очаг – 24 и 13 км ( $\rho=1.8 \text{ г/см}^3$ ;  $Vp=1.9 \text{ км/с}$ ). Каналы вулкана представляются в виде цилиндров с диаметрами 250 м, 160 м и 130 м для подпитывающего, среднего и бывшего каналов соответственно.

## Значения упругих параметров вулкана Эльбрус

	$V_p$ , км/с	$V_s$ , км/с	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>		$V_p$ , км/с	$V_s$ , км/с	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Слой +II	2,85	1,65	2,4	Слой IV	5,82	3,37	2,7
Слой +I	3,1	1,79	2,66	Слой V	5,97	3,45	2,75
Слой I	3,2	1,82	2,7	Слой VI	6,43	3,72	2,78
Слой II	5,9	3,42	2,85	Слой VII	6,95	4,03	2,81
Слой III	6,22	3,59	2,62	Слой VIII	8,1	4,68	2,85

На основе предложенной модели вулкана Эльбрус проведен ряд вычислительных экспериментов. Каждый расчет проводился на 11 узлах кластера НКС-30Т+GPU, оснащенных графическими картами. Для моделирования процесса на 12000 шагов по времени тратится в среднем чуть больше полутора часов. Система возбуждения для всех расчетов состоит из точечного источника типа «центр давления» с частотой 8 Гц, располагающимся вблизи свободной поверхности в левой части расчетной области в одной плоскости с осью симметрии магматических каналов и камер. В качестве моделируемой среды взят фрагмент предложенной приближенной модели стратовулкана Эльбрус, включающий в себя только верхнюю магматическую камеру в форме эллипсоида и прилегающий к ней подпитывающий канал, расположенные в пятислойной среде. Разница между этими средами заключается в том, что в одном случае верхний канал заполнен магмой (момент извержения), а во втором случае он сливается с окружающими слоями (равновесное состояние), рис 3.

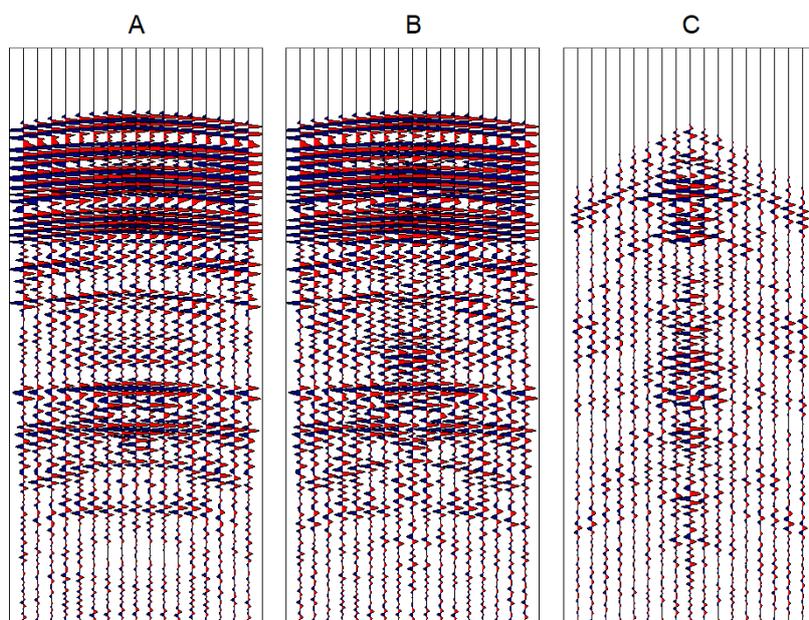


Рис. 3. Теоретические сейсмограммы для компоненты U:

A – среда без верхнего канала, B – среда, содержащая верхний канал, заполненный магмой (момент извержения), C – разница между сейсмограммами A и B

## *Обсуждение*

Проведенные численное моделирование вулканических структур показывает, что сейсмическое поле вулканов имеет сложную структуру, зависящую от геометрии исследуемых объектов и их реологических характеристик и, именно, это обстоятельство позволяет проводить вибросейсмический мониторинг этих сейсмоопасных объектов. Проводя регулярные вибросейсмические зондирования и отслеживая в динамике поведение сейсмического поля по сейсмотрассам можно проследить существенные изменения напряженно-деформированного состояния исследуемого объекта, которые могут привести к катастрофическим явлениям. Насколько известно авторам, в такой постановке задача мониторинга решается впервые.

## *Заключение*

Рассмотрен подход к созданию метода мониторинга вулканических структур на основе моделирования вулканических структур с применением динамической теории упругости. Рассмотрены два типа вулканов – грязевой и магматический. Разработаны алгоритмы и комплексы программ для проведения численных экспериментов. На основании модельных исследований сделан вывод о возможности вибросейсмического мониторинга вулканов этого типа.

## *Благодарности*

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-07-00434, 16-07-01052, 17-07-00872, 16-01-00455 и государственного задания ФАНО России № 0315-2016-009. Работа была выполнена с использованием ресурсов ЦКП Сибирский Суперкомпьютерный Центр ИВМиМГ СО РАН.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alekseev A. S., Glinsky B. M., Kovalevsky V. V., Khairtdinov, M. S. Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results // Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration. – 2010. – Vol. 40. – P. 105–120.
2. Glinskiy B. M., Martynov V. N., Sapetina A. F. 3D modeling of seismic wave fields in a medium specific to volcanic structures // Yakutian Math. J. – 2015. – Vol. 22(3). – P. 84–98.
3. You, SH., Konstantinou K. I., Gung Y. et al. Three-dimensional shallow velocity structure beneath Taal Volcano, Philippines // Journal of Seismology. – 2017. – Vol. 21(6). – P. 1427–1438.
4. Tran A., Rudolph M. L., Manga M. Bubble mobility in mud and magmatic volcanoes. Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2015. – Vol. 294. – P. 11–24.
5. Burschil T., Beilecke T., Krawczyk C. M. Finite-difference modelling to evaluate seismic P-wave and shear-wave field data // Solid Earth. – 2015. – Vol. 6. – P. 33–47.
6. Ксатакина Е. В., Кулаков И. Ю., Василевский А. Н. Источники питания супервулкана Тоба по сейсмическим данным // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – № 2(2). – С. 197–201.
7. Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Верниковский В.А. Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и влк. Кизи-

- мен (Камчатка) по данным сейсмической томографии // Геология и геофизика. – 2016. – № 57(1). – С. 109–124.
8. Baghzendani H. R., Aghajani H., Solimani M. Subsurface modeling of mud volcanoes, using density model and analysis of seismic velocity // *Journal of Mining & Environment*. – 2015. – Vol. 6(1). – P. 31–39.
9. Hayakawa Y. S., Kusumoto S., Matta N. Seismic and inter-seismic ground surface deformations of the Muroto mud volcano (central Japan): a laser scanning approach // *Progress in Earth and Planetary Science*. – 2017. – Vol. 4:3.
10. Lupi M., Ricci B. S., Kenkel J., Ricci T., Fuchs F., Stephen A. Miller, Andreas Kemna. Subsurface fluid distribution and possible seismic precursory signal at the Salse di Nirano mud volcanic field // *Geophysical Journal International*. – 2016. – Vol. 204(2). – P. 907–917.
11. Koulakov I., Gladkov V., El Khrepy S., Al-Arifi N., Fathi I. H. Application of repeated passive source travel time tomography to reveal weak velocity changes related to the 2011 Tonoku-Oki MW 9.0 Earthquake // *JGR: Solid Earth*. – 2016. – Vol. 121(6). – P. 4408–4426.
12. Glinskiy B. M., Kulikov I. M., Chernykh I. G., Snytnikov A. V., Sapetina A. F., & Weins D.V. The integrated approach to solving large-size physical problems on supercomputers // *RuSCDays 2017 CCIS*. – 2017. – Vol. 793. – P. 278–289.
13. Glinskiy B. M., Sapetina A. F., Martynov V. N., Weins D. V., Chernykh I. G. The hybrid-cluster multilevel approach to solving the elastic wave propagation problem // *PCT 2017, CCIS*. – 2017. – Vol. 753. – P. 261–274.
14. Sapetina A. F. Supercomputer-aided comparison of the efficiency of using different mathematical statements of the 3D geophysical problem // *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Numerical Analysis*. – 2016. – Vol. 18. – P. 57–66.
15. Glinskiy B., Kulikov I., Chernykh I., Weins D., Snytnikov A., Nenashev V., Andreev A., Egunov V., Kharkov E. The Co-design of Astrophysical Code for Massively Parallel Supercomputers // *Proceedings of 16th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP) LNCS*. – 2016. – Vol. 10049. – P. 342–353.
16. Bihn M., Weiland T. A. Stable Discretization Scheme for the Simulation of Elastic Wave // *Proceedings of the 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics (IMACS 1997)*. – 1997. – Vol. 2. – P. 75–80.
17. Глинский Б. М., Караваев Д. А., Ковалевский В. В., Мартынов В. Н. Численное моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана «Гора Карабетова» вибросейсмическими методами // *Вычислительные методы и программирование*. – 2010. – № 11(1). – С.95-104.
18. Karavaev D. A., Glinsky B. M., Kovalevsky V. V. A technology of 3D elastic wave propagation simulation using hybrid supercomputers // *CEUR Workshop Proc. 1. "RuSCDays 2015 - Proceedings of the 1st Russian Conference on Supercomputing Days 2015"*. – 2015. – P. 26–33.
19. Глинский Б. М., Мартынов В. Н., Сапетина А. Ф. Технология суперкомпьютерного 3D моделирования сейсмических волновых полей в сложно построенных средах // *Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: Вычислительная математика и информатика*. – 2015. – №4(4). – С. 101–116.
20. Караваев Д.А. Моделирование сейсмических полей для сред с существенно неоднородным распределением упругих параметров // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2017. – №4(1). – С. 201–204.
21. Komatitsch, D., Martin R. An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation // *Geophysics*. – 2008. – Vol. 73(4). – P. T51–T61.
22. Ovsyuchenko A. N., Sobisevich A. L., Sysolin A. I. On the relationship between recent tectonic processes and mud volcanism by the example of Mt. Karabetov, Taman Peninsula // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2017. – Vol. 53(4). – P. 606–617.
23. Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Канониди Х. Д., Канониди К. Х., Лиходеев Д. В., Преснов Д.А. О дилатансных образованиях, участвующих в формировании корневых структур

тур и выводящих каналов грязевых вулканов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2015. – №3(187). – С. 53–59.

24. Тверитинова Т.Ю., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Лиходеев Д.В. Структурная позиция и особенности строения и формирования грязевого вулкана горы Карабетова // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2015. – № 2(40). – С. 106–122.

## REFERENCES

1. Alekseev, A. S., Glinsky, B. M., Kovalevsky, V. V., & Khairtdinov, M. S. (2010) Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results. Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration, Vol. 40, 105–120. doi: 10.1016/s0950-1401(10)04011-5.

2. Glinskiy, B. M., Martynov, V. N., & Sapetina, A. F. (2015). 3D modeling of seismic wave fields in a medium specific to volcanic structures. Yakutian Math. J., 22(3), 84–98.

3. You, SH., Konstantinou, K. I., Gung, Y. et al. (2017). Three-dimensional shallow velocity structure beneath Taal Volcano, Philippines. Journal of Seismology, 21(6), 1427–1438.

4. Tran, A., Rudolph, M. L., & Manga, M. (2015). Bubble mobility in mud and magmatic volcanoes. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 294, 11–24.

5. Burschil, T., Beilecke, T., & Krawczyk, C. M. (2015). Finite-difference modelling to evaluate seismic P-wave and shear-wave field data. Solid Earth, 6, 33–47.

6. Kasatkina, E. V., Koulakov, I. Y., & Vasilevsky, A. N. (2016) Toba supervolcano feeding sources inferred by seismic data. Interekspo GEO-Sibir [Interexpo GEO-Siberia], 2(2), 197–201 [in Russian].

7. Koulakov, I. Y., Kukarina, E. V., Gordeev, E. I., Chebrov, V. N., & Vernikovskiy, V. A. (2016) Magma sources in the mantle wedge beneath the volcanoes of the Klyuchevskoy group and Kizimen based on seismic tomography modeling. Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics], 57(1), 109–124 [in Russian]. doi: 10.15372/GiG20160106.

8. Baghzendani, H. R., Aghajani, H., & Solimani, M. (2015). Subsurface modeling of mud volcanoes, using density model and analysis of seismic velocity. Journal of Mining & Environment, 6(1), 31–39.

9. Hayakawa, Y. S., Kusumoto, S. & Matta, N. (2017). Seismic and inter-seismic ground surface deformations of the Muroto mud volcano (central Japan): a laser scanning approach. Progress in Earth and Planetary Science, 4:3. doi: 10.1186/s40645-016-0116-3.

10. Lupi, M., Ricci, B. S., Kenkel, J., Ricci, T., Fuchs, F., Stephen, A. Miller & Andreas Kemna. (2016). Subsurface fluid distribution and possible seismic precursory signal at the Salse di Nirano mud volcanic field. Geophysical Journal International, 204(2), 907–917.

11. Koulakov, I., Gladkov, V., El Khrepy, S., Al-Arifi, N., & Fathi, I. H. (2016). Application of repeated passive source travel time tomography to reveal weak velocity changes related to the 2011 Tonoku-Oki MW 9.0 Earthquake. JGR: Solid Earth, 121(6), 4408–4426.

12. Glinskiy, B. M., Kulikov, I. M., Chernykh, I. G., Snytnikov, A. V., Sapetina, A. F., & Weins, D.V. (2017). The integrated approach to solving large-size physical problems on supercomputers. RuSCDays 2017. CCIS, Vol. 793, 278–289. doi: 10.1007/978-3-319-71255-0\_22.

13. Glinskiy, B. M., Sapetina, A. F., Martynov, V. N., Weins, D. V., & Chernykh, I. G. (2017). The hybrid-cluster multilevel approach to solving the elastic wave propagation problem. PCT 2017, CCIS, Vol. 753, 261–274. doi: 10.1007/978-3-319-67035-5\_19.

14. Sapetina, A. F. (2016). Supercomputer-aided comparison of the efficiency of using different mathematical statements of the 3D geophysical problem. Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Numerical Analysis. 18, 57–66.

15. Glinskiy, B., Kulikov, I., Chernykh, I., Weins, D., Snytnikov, A., Nenashev, V., Andreev, A., Egunov, V., & Kharkov, E. (2016). The Co-design of Astrophysical Code for Massively Parallel Supercomputers. Proceedings of 16th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP) LNCS, 10049, 342–353.

16. Bihn, M., & Weiland, T. A. (1997). Stable Discretization Scheme for the Simulation of Elastic Wave. Proceedings of the 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modeling and Applied Mathematics (IMACS 1997), Vol. 2, 75–80.
17. Glinskiy, B. M., Karavaev, D. A., Kovalevskiy, V. V., & Martynov, V. N. (2010). Numerical modeling and experimental research of the «Karabetov Mountain» mud volcano by vibroseismic methods. Numerical Methods and Programming, Vol. 11, 95–104 [in Russian].
18. Karavaev, D. A., Glinsky, B. M., & Kovalevsky, V. V. (2015). A technology of 3D elastic wave propagation simulation using hybrid supercomputers. CEUR Workshop Proc. 1. "RuSCDays 2015 - Proceedings of the 1st Russian Conference on Supercomputing Days 2015", 26–33.
19. Glinskiy, B. M., Martynov, V. N., & Sapetina, A. F. (2015). Technology of supercomputer simulation of seismic wave fields in complicated media. Vestnik IUzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika [Bulletin of the South Ural State University. Computational Mathematics and Software Engineering], 4(4), 101–116 [in Russian].
20. Karavaev, D. A. (2017) Simulation of seismic field for media with significantly inhomogeneous distribution of elastic parameters. Interekspo GEO-Sibir [Interexpo GEO-Siberia], 4(1), 201–204 [in Russian].
21. Komatitsch, D., & Martin, R. (2008) An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation. Geophysics, 73(4), T51–T61.
22. Ovsyuchenko, A. N., Sobisevich, A. L., & Sysolin, A. I. (2017). On the relationship between recent tectonic processes and mud volcanism by the example of Mt. Karabetov, Taman Peninsula. Izvestiya. Physics of the Solid Earth, 53(4), 606–617. doi: 10.1134/S1069351317040073.
23. Sobisevich, L. E., Sobisevich, A. L., Kanonidi, K. D., Kanonidi, K. K., Likhodeev, D. V., & Presnov, D. A. (2015). On a Dilatancy Structures Involved in the Formation of Roots and Feeding System of Mud Volcanoes. Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Estestvennye nauki [University News. North-Caucasian Region. Natural Sciences Series], 3(187), 53–59 [in Russian].
24. Tveritina, T. Y., Sobisevich, A. L., Sobisevich, L. E., & Likhodeev, D.V. (2015). Structural position and structure peculiarities of the mountain Karabetov mud volcano. Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana [Geology and Minerals of the World Ocean], 2(40), 106–122 [in Russian].

© В. Н. Мартынов, Б. М. Глинский, Д. А. Караваев, А. Ф. Сапетина, 2018

## **ОСОБЕННОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОЗЕР СИБИРИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

### ***Михаил Владимирович Якутин***

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, тел. (383)363-90-25, e-mail: yakutin@issa.nsc.ru; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, профессор кафедры экологии и природопользования

### ***Людмила Юрьевна Анощенко***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86, e-mail: milaa2006@ngs.ru

### ***Александр Николаевич Пучнин***

Якутская государственная сельскохозяйственная академия, 677007, Россия, г. Якутск, ул. Красильникова, 15, ассистент кафедры природообустройства, тел. (411)235-78-45, e-mail: puchninsasha@rambler.ru

В статье на основании литературных и собственных данных анализируется современное состояние и особенности изменения площадей водного зеркала бессточных озер Сибири под влиянием глобальных процессов, ведущих к изменению климата планеты. Предлагается использование методов дистанционного зондирования Земли и картографических методов для анализа динамики изменения водности бессточных озер юга Западной Сибири и Центральной Якутии. Делается вывод о перспективах применения различных методов в экологическом мониторинге озер внутренних районов Азии.

**Ключевые слова:** бессточные озера, глобальное изменение климата, дистанционное зондирование Земли, картографический метод, озера, экологический мониторинг.

## **FEATURES OF ECOLOGICAL MONITORING OF SIBERIAN LAKES IN CONDITIONS OF GLOBAL CLIMATE CHANGE**

### ***Mikhail V. Yakutin***

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Associate Professor, Leading Researcher, Biogeocenology Laboratory, phone: (383)363-90-25, e-mail: yakutin@issa.nsc.ru; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor, Department of Ecology and Environmental Management

### ***Lyudmila Yu. Anopchenko***

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (383)361-08-86, e-mail: milaa2006@ngs.ru

### ***Alexander N. Puchnin***

Yakutsk State Agricultural Academy, 677007, Russia, Yakutsk, 15 Krasilnikova St., Assistant, Department of Natural Arrangement, phone: (411)235-78-45; e-mail: puchninsasha@rambler.ru

On the basis of literature and own data the article analyzes the current state and features of changes in the volumes, levels and areas of the water mirror of the Siberian drain lakes under the influence of global processes leading to climate change in the planet. The use of cartographic methods and methods of remote sensing of the Earth for the analysis of dynamic of change of the drainless lakes of the South of Western Siberia and Central Yakutia is offered. The conclusion is made about future trends of using different methods in environmental monitoring of lakes in the interior Asia.

**Key words:** drainless lakes, global climate change, remote sensing of the Earth, cartographic method, lakes, ecological monitoring.

### *Введение*

Наибольшее количество воды в жидком состоянии на суше сосредоточено в озерах. Площадь всех озер земного шара достигает 2 млн. км<sup>2</sup>, а общий их объем составляет по разным оценкам от 176 тыс. км<sup>3</sup> до 275 тыс. км<sup>3</sup> [1, 2]. Объем, площадь водного зеркала и высота стояния уровня озер в значительной степени зависит от общей увлажненности континентов. При этом наиболее четко эта зависимость проявляется по отношению к бессточным озерам, которые характеризуются сравнительно небольшой общей площадью. Такие озера служат четкими индикаторами изменения климатических условий: их объем, уровень и площадь увеличиваются при повышении общей увлажненности континентов, и могут значительно уменьшаться в периоды снижения увлажненности. Бессточные озера в основном располагаются в зоне недостаточного увлажнения во внутренних областях континентов. Общая площадь бессточных территорий составляет 34 % территории суши без островов (более 30 млн. км<sup>2</sup>). Поверхностный сток этих областей оказывается на 15–20 % ниже стока внешних склонов и практически весь расходуется на испарение [3]. Общее количество осадков в районе бессточных территорий по некоторым оценкам составляет около 8700 км<sup>3</sup>, или 288 мм, а суммарный сток рек – около 1010 км<sup>3</sup>, или всего 33 мм. При этом на Азиатскую бессточную область приходится 45 % общего стока рек бессточных территорий. Суммарное испарение с бессточных территорий планеты составляет 8100 км<sup>3</sup>, или 268 мм [4].

Потепление климата планеты в XX веке сопровождается ростом испарения, изменением циркуляционных процессов в атмосфере и сокращением стока во внутри континентальных районах, что привело к снижению увлажненности в первую очередь бессточных территорий. Это нашло отражение в снижении уровней и объемов многих бессточных озер. Руководствуясь расчетами прироста суммарного объема бессточных озер в зависимости от колебаний их уровня и площади, можно сделать вывод, что наиболее сильное сокращение водоемов происходило в период наибольшего потепления, в 40-е годы XX века. В это время суммарный расход озерных вод мог достигать 380 км<sup>3</sup> в год, притом, что с 1890 по 1940 гг. запасы воды в озерах сократились более чем на 6000 км<sup>3</sup>, или на 3–4 % их общего объема. С середины 60-х годов и до 1975 года, в период небольшого похолодания, суммарный объем озер увеличился на 2000 км<sup>3</sup>, но по-

следующая волна глобального потепления привела к дальнейшему сокращению их объема [5].

Цель настоящего исследования состояла в анализе особенностей применения методов дистанционного зондирования Земли и картографических методов в экологическом мониторинге бессточных озер и приозерных территорий на примере озер Западной и Восточной Сибири.

### *Методы и материалы*

Важнейшими методами оценки динамики площади водного зеркала озер в настоящее время являются методы дистанционного зондирования Земли и картографический метод. Дистанционное исследование обеспечивает быстрый и эффективный способ получения информации об использовании земель, состоянии экосистем, степени нарушенности природных и природно-антропогенных комплексов. Среди физических методов, применяемых в экологическом мониторинге в настоящее время, особое место занимают оптические дистанционные методы, основанные на использовании закономерностей взаимодействия излучения с веществом, на знании оптических свойств исследуемых объектов, на понимании сущности оптических явлений, протекающих в природной среде [6].

Оптические и радиационные свойства экосистем непосредственно определяются, в первую очередь, растительным покровом, а там, где покрытие растительности меньше 30–40 %, также и почвами. Растительность и почвы представляют ту физическую деятельную поверхность, которая формирует отражение, падающего солнечного света и собственное излучение. Основные экобиоморфы растительности и классы типов почв характеризуются специфическими оптическими свойствами [7, 8]. Космический снимок содержит подробную информацию о состоянии объектов земной поверхности в момент съемки. Особенность работы с космическими снимками связана с отличительными свойствами самих космических снимков – их большой обзорностью и генерализованностью изображения, одновременным отображением на снимках всех компонентов ландшафта. Для дешифрирования снимков используют специальные методы и дополнительные данные, полученные из различных источников – карт, отчетов о полевых исследованиях и ранее полученных результатов анализа снимков той же территории [9].

В данной работе анализ динамики площадей аласных озер Центральной Якутии был проведен для составления мерзлотно-ландшафтной картосхемы. Для чего были использованы: методика экспертного дешифрирования и космические снимки высокого разрешения КА Landsat 7 ETM от 10.07.2000 и Landsat 5 TM от 21.08.2009 (30 м) в проекции WGS-84, программа MapInfo и карты масштаба 1:200 000. Общая площадь аласов рассчитывалась в программе Excel. Коэффициент аласности рассчитывался по отношению суммы площадей всех аласов к площади всей территории [10].

Подсчет суммарной площади аласов дает общую картину термокарстового разрушения многолетнемерзлых пород (ММП). С целью установления общей площади нарушения устойчивости ММП термокарстом в данной работе сделана попытка дать количественную оценку характера распространения термокарстовых котловин в пределах Лено-Вилуйского междуречья. Выбранный нами район общей площадью 3588,9 км<sup>2</sup> представляет собой типичный для Лено-Вилуйского междуречья тип местности.

Картографический метод создания глобальной системы мониторинга предполагает развертывание работ при обследовании и изучении любой территории в двух основных направлениях: 1) создание базовой инвентаризационной картографической документации, отражающей современное состояние и оценку природных ресурсов и 2) картографирование динамики изменений природной среды, предусматривающее обновление инвентаризационных карт, создание специальных карт динамики и прогноза, т.е. систематическое картографическое слежение за состоянием природной среды и ее изменениями, обусловленными хозяйственной деятельностью человека [11]. Картографический метод исследования обладает всеми свойствами научного метода. Он имеет четко очерченный круг задач, систему определенных и взаимосвязанных приемов анализа и преобразования картографического изображения. В данной работе производился анализ разновозрастных карт. Главная цель сравнения таких карт – повторное определение состояния и пространственного положения явлений, изучение их динамики и эволюции. Сравнивая карты, на которых явления изображены в различные моменты времени, можно выявить изменения, произошедшие за любой промежуток времени и оценить картометрически приращения координат, изменения расстояний, площадей. По разновременным картам можно оценить не только величину изменения, но и его направление [12].

Территория обсыхающей озерной депрессии Чаны–Абышкан–Сумы–Чебаклы является хорошим модельным объектом для изучения особенностей применения картографических методов в экологическом мониторинге территорий пойм, обсыхающих соленых озер. Для определения темпов обсыхания Чановской озерной системы за период с 1786 по 2001 гг. была построена карто-схема с использованием картографического метода – проведен сравнительный анализ данных разновозрастных карт (1786, 1813, 1824, 1930, 1987, 2001 гг. издания) [13–17]. Анализ динамики изменения береговых линий на территории обсыхающего дна озер Чановской системы производился с помощью программного продукта MapInfo.

## ***Результаты***

Аласы – это врезанные мезодепрессии среди тайги термокарстового происхождения. Центральная часть аласа занята обычно озером, вокруг которого поясами развиты болотная, луговая и остепненная растительность и соответствующие им почвы [18]. Глубина аласов – от 2 до 30 м в зависимости от мощно-

сти вытаявшего ледового комплекса. Аласы занимают значительные площади в Центральной Якутии, например, в Лено-Амгинском междуречье ими занято 20–30 % общей площади. Благодаря их высокой продуктивности здесь еще в конце 1 тысячелетия н.э. сформировался один из самых северных очагов скотоводства на планете [19].

Своим образованием аласы обязаны ледовому комплексу, который является основой рельефа Якутии в зоне средней и северной тайги. Этот комплекс сформировался как результат сурового и влажного климата плейстоцена и сохраняется благодаря современным экстроконтинентальным климатическим условиям. В верхнем плейстоцене и голоцене вследствие колебаний климата произошла частичная деградация ледового комплекса, связанная с его протаиванием и образованием отдельных термокарстовых котловин. В современных условиях вследствие аридизации климата Центральной Якутии развитие природного термокарста сильно замедлено. Но, в общем, аласный рельеф можно считать промежуточным типом рельефа, этапом превращения равнины, сложенной ледовым комплексом, в ландшафт с незначительным содержанием ледового комплекса [19].

Началом термокарста является появление первичных озер на поверхности равнины, сложенной ледовым комплексом. Озера являются аккумуляторами тепла, и это приводит к протаиванию ледового комплекса под ними и оседанию вмещающих пород. Таким образом, озеро формирует контур будущей аласной котловины. На дне озера накапливается сапропель, аккумуляруются карбонаты в виде обильных мелких ракушек и утяжеляется механический состав почвы. На следующем этапе иссушение аласа приводит к формированию вокруг аласного озера поясов с различным увлажнением: избыточным, нормальным и недостаточным. С поясами увлажнения связано формирование поясов различных экосистем аласов: болотного, лугового и остепненного [19].

Для выявления характеристик распространения аласов введен термин «аласность», под которым понимается отношение суммы площадей аласов к площади всей территории. Полученный результат выражается в процентах. Площадь аласа – это вся площадь дна котловины или долины, т.е. площадь поверхности озера вместе с площадью лугового пространства, которая показывает площадь разрушения многолетнемерзлых пород термокарстовыми процессами в голоценовое время [20]. На основе построенной мерзлотно-ландшафтной картосхемы (рис. 1) была рассчитана общая площадь аласов и водных объектов. На исследованной территории общая площадь аласов составила 303,8 км<sup>2</sup>, водных объектов 25,1 км<sup>2</sup>. На основании этих расчетов был вычислен коэффициент аласности для данного района, который составил 8,46 % [21]. Ранее для данной территории и по этой же методике, но с использованием аэрофотоснимков и карт масштаба 1:100 000, был рассчитан коэффициент аласности. Площадь аласов измеряли палеткой, коэффициент аласности при использовании этих материалов составил около 1% [20].

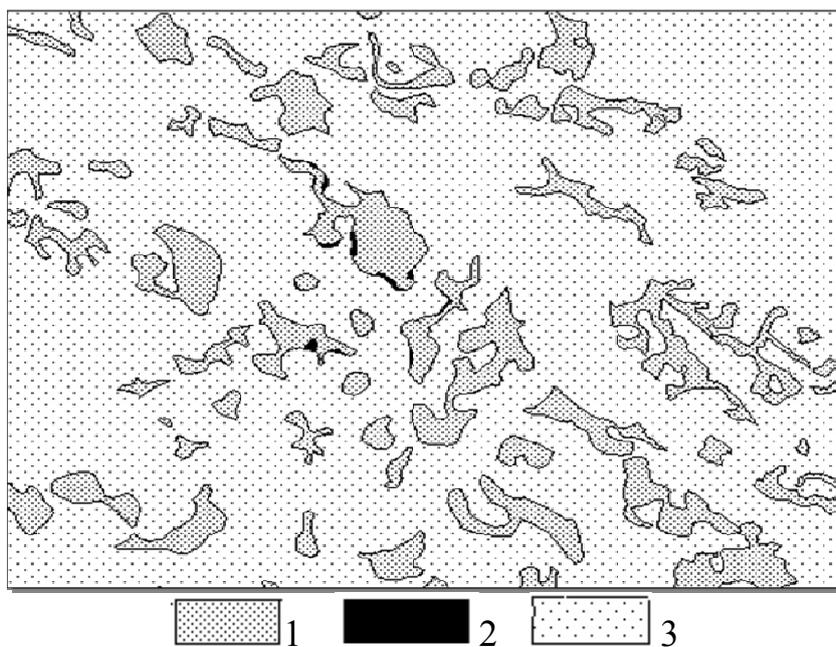


Рис. 1. Фрагмент картосхемы динамики разрушения межлассного пространства. Масштаб 1: 50 000 (1 – термокарстовые понижения на 2000 г., 2 – термокарстовые понижения на 2009 г., 3 – территории с ненарушенной многолетней мерзлотой)

Барабинская равнина, или Бараба, расположена в юго-восточной части обширной Западно-Сибирской равнины. Площадь, занимаемая Барабинской равниной, составляет 117,4 тыс. км<sup>2</sup> при протяженности с севера на юг около 300 км и с запада на восток – 570 км. Особенностью территории является большое количество озер и большие площади болот и заболоченных земель, которые расположены в понижениях рельефа. В Барабе число таких озер достигает 2555 без мелких, часто пересыхающих. Общая площадь водного зеркала в Барабе составляет 4918 км<sup>2</sup>, т.е. 4 % от всей ее площади. Озеро Чаны (включая Б. Чаны, М. Чаны, Яркуль) самое большое, имеет площадь водного зеркала 2140 км<sup>2</sup>. В настоящее время озеро Большие Чаны состоит из четырех почти самостоятельных в гидробиологическом, гидрохимическом и гидробиологическом отношении плесов: Яркового, Тагано-Казанцевского и Чиняихинского. В целях уменьшения потерь воды на испарение в сентябре 1971 года через группу островов посредством постройки дамб Юдинский плес был отчленен от островной части озера Большие Чаны [22]. В последние десятилетия на фоне развития глобального парникового эффекта происходит повышение среднесезонных и среднегодовых температур и на территории Барабинской равнины [23] Одновременно с этим наблюдается снижение водности рек. Все это приводит к обмелению и обсыханию озер Барабы [24]. На обсыхающих территориях активно идут процессы формирования молодых экосистем и почв.

Из всего числа озер, располагающихся на территории Барабинской равнины, наибольший интерес вызывает самое крупное – усыхающее оз. Чаны. Являясь

бессточным водоемом, оно служит индикатором в выявлении фаз повышенной и пониженной водности. Чановская озерная система активно усыхает на протяжении длительного времени в связи с усилением аридности климата юга Западной Сибири. Площадь водного зеркала озерной системы Чаны–Абышкан–Сумы–Чебаклы сократилась с 15 тыс. км<sup>2</sup> (конец XVIII века) до 1293 км<sup>2</sup> в настоящее время [22]. Пульсационное изменение водности озера Чаны происходило под влиянием климатических факторов. Параллельно с пульсациями в долговременной перспективе происходило постепенное усыхание озера [24]. На основании карт разных годов издания была составлена Картограмма этапов обсыхания Чаны–Абышкан–Сумы–Чебаклинской озерной системы с 1786 по 2001 гг. (рис. 2). Нанесение участка бывшего озерного дна на карту в качестве участка суши свидетельствовало о том, что данный участок перестал заливаться водой даже в годы с повышенной водностью, и здесь начинают формироваться молодые экосистемы и почвы.

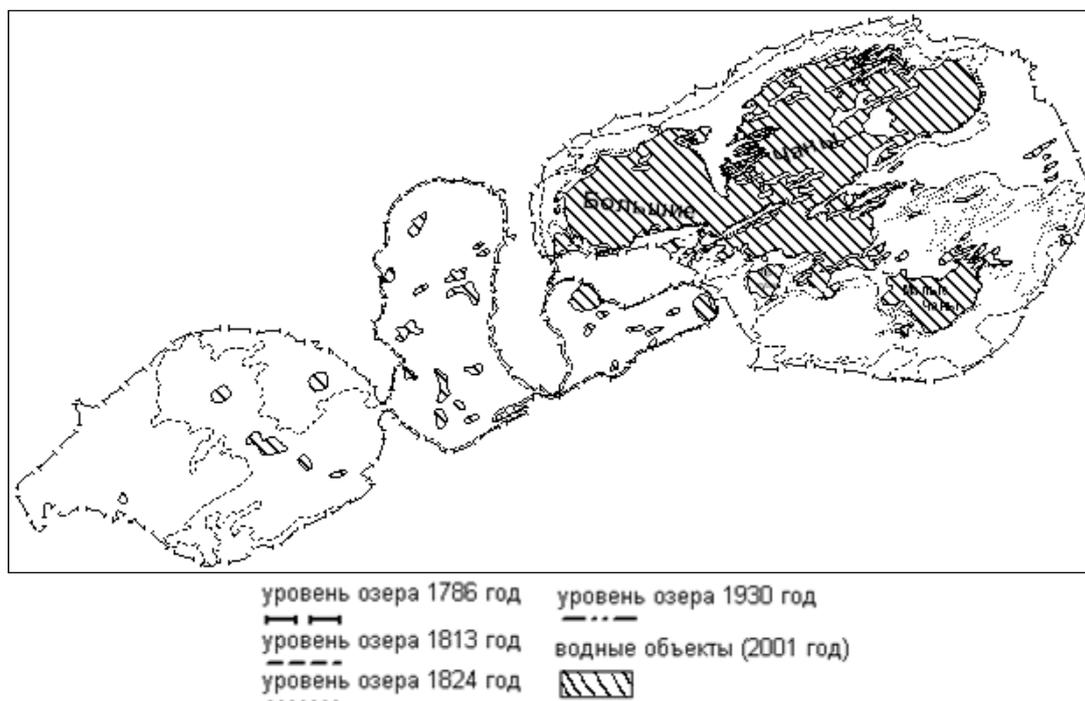


Рис. 2. Картограмма этапов обсыхания Чаны–Абышкан–Сумы–Чебаклинской озерной системы с 1786 по 2001 гг.

На основании составленной картограммы можно сделать вывод, что максимальная площадь поймы озерной системы Чаны–Абышкан–Сумы–Чебаклы обсохла 90–157 лет назад и составила 3364,4 км<sup>2</sup>. Второй по масштабам период обсыхания произошел 157–184 года назад и составил 2022,2 км<sup>2</sup>. За последние 90 лет площадь озерной системы уменьшилась на 850,0 км<sup>2</sup>. Отчетливо видно, что 90 лет назад процесс обсыхания озер Чановской озерной системы замедлился, что связано с уменьшением площади озера.

## Обсуждение

В XX веке в связи с развитием метеорологии впервые стали возможными точные измерения климатических показателей практически на всей территории планеты. В этом же столетии впервые встал вопрос о глобальном воздействии человека на климат планеты. На фоне инструментально зарегистрированных изменений климата в течение последних 140 лет климатологи выделяют достоверное потепление 1904–1944 гг., достоверное похолодание 1944–1976 гг. и, наконец, достоверное потепление 1976–1999 гг. Международная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), взяв за основу данные, поступившие от нескольких тысяч метеорологических станций, расположенных по всему миру, выяснила, что за последние 140 лет средняя величина изменения температуры составила  $0,6^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . По мнению МГЭИК до 1976 г. изменчивость климата не превышала естественных вариаций, оцененных на отрезке около 1000 лет, но после этого амплитуда колебания превысила эту величину, и стало возможным говорить о глобальном потеплении климата [25].

В результате потепления климата увеличилось расстояние до зоны вечной мерзлоты в Аляске и Канадской Арктике, возросла средняя температура озер в Канаде, уменьшилась годовая максимальная протяженность ледникового покрова в Антарктиде и Арктике, уменьшилось количество айсбергов в Европе и в других районах [26]. Современное потепление диагностируется практически повсеместно. Наибольшие изменения отмечены над континентами между  $40$  и  $70^{\circ}$  с.ш. Практически повсеместно положительный тренд среднегодовых значений температуры обнаружен на территории России: на ее европейской территории, Дальнем Востоке и Чукотке это  $0,3$ – $0,4^{\circ}\text{C}$  за 10 лет, и в Сибири это  $0,5$ – $0,7^{\circ}\text{C}$  за 10 лет. Основной вклад создается ростом температур холодного сезона. Для зимних температур тренд в Центральной и Южной Сибири составляет  $1,5$ – $1,7^{\circ}\text{C}$  за 10 лет. А летом статистически значимый рост не диагностируется. За последние 100 лет над континентами во внетропических широтах отмечается также положительный тренд осадков (примерно 10 % от годовой суммы). И в целом можно говорить о слабо выраженном согласованном росте температуры и осадков в умеренных и средних широтах [27].

Климат Якутии характеризуется резкой континентальностью, большими колебаниями температур и малым количеством осадков. Вся территория Якутии, за исключением юго-западной части, расположена в зоне сплошной вечной мерзлоты, мощность которой колеблется от нескольких десятков метров до 400–600 м и более. Повсеместное распространение мерзлых пород способствует деформации почвогрунтов (просадки, бугры и т.д.), а частичная деградация ледового комплекса приводит к широкому распространению таких форм рельефа, как аласные котловины [28]. Разрушение ледового комплекса в условиях аридного климата закономерно приведет к замене таежных экосистем экосистемами холодных степей. На территории Центральной Якутии на протяжении последних 15 лет наблюдается устойчивая тенденция к увеличению среднемесячных температур воздуха и суммарного количества осадков в наиболее теп-

лые месяцы года с июля по сентябрь. При этом происходит незначительный общий рост количества осадков. При сохранении этих тенденций мы вправе ожидать увеличение скоростей деградации ледового комплекса и общую активизацию процессов, ведущих к эволюционной замене зональных палевых мерзлотных почв аласными почвами [21].

Глобальные изменения климата проявляются и на территории водосборного бассейна озера Чаны. На протяжении последних 70 лет наблюдается устойчивая тенденция к увеличению среднемесячных температур воздуха в течение всех 12 месяцев года. Наблюдается также незначительное общее увеличение суммарного количества осадков, но в месяцы с наибольшей испаряемостью (июнь и июль) количество осадков на Причановской территории Барабы за последние 70 лет, в целом, снижается. Все эти тенденции свидетельствуют о постепенном усилении аридности климата юга Западной Сибири и сохранении тенденции к снижению водности рек и обсыханию озер Барабинской равнины [29].

### *Заключение*

Проблема поиска надежных методов мониторинга разнообразных экосистем является одной из важнейших в современной геоэкологии. Результаты данного исследования свидетельствуют о том, что использование методов дистанционного зондирования позволяет с большой точностью и в короткие сроки проводить мониторинг состояния термокарстовых образований на больших территориях, находящихся в зонах с широким распространением многолетнемерзлых пород. Этот метод в будущем должен стать основным для оценки коэффициентов аласности территорий Южной и Центральной Якутии. Картографический метод может быть успешно использован в мониторинге долговременных трендов водности озер бессточных территорий и дает возможность более или менее точно оценить возраст молодых почв, формирующихся на обсохшем озерном дне.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 638 с.
2. Львович М. И. Мировые водные ресурсы и их будущее. – М.: Мысль, 1974. – 448 с.
3. Клиге Р. К. Изменения глобального водообмена. – М.: Наука, 1985. – 247 с.
4. Воскресенский К. П. Водный баланс и водные ресурсы суши / Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – С. 490–497.
5. Клиге Р. К., Евсеева Л. С. Аномалии режима вод суши / Современные глобальные изменения природной среды. В 2-х томах. – Т. 1. ; [Отв. ред. Н. С. Касимов, Р. К. Клиге]. – М.: Научный мир, 2006. – С. 246–269.
6. Зятькова Л. К., Елепов Б. С. У истоков аэрокосмического мониторинга природной среды. – Новосибирск: СГГА, 2007. – 380 с.
7. Виноградов Б. В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. – М.: Наука, 1984. – 320 с.

8. Савиных В. П., Крапивин В. Ф., Потапов И. И. Информационные технологии в системах экологического мониторинга. – М.: ООО Геодезкартиздат, 2007. – 392 с.
9. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
10. Босиков Н. П. Аласность Центральной Якутии / Геокриологические условия в горах и на равнинах Азии. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 1978. – С. 113–118.
11. Николаев В. А. Картографические методы в научных исследованиях. – Новосибирск: Наука, 1986. – 96 с.
12. Берлянт А. М. Картографический метод исследования. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 252 с.
13. Озеро Чаны на карте Кольванского наместничества. Масштаб: 15 верст в дюйме. – Архив главного штаба, 1786. – Карта №384.
14. Ядринцев Н.М. Карта озер Чаны, Сумы, Абышкан. Тобольской и Томской губернии. Состояние местности на 1880 г., Масштаб: в английском дюйме 10 верст. – Известия Императорского Географического общества. Том 22. С.-Пб., 1887. – 676 с.
15. Чемоданов С. Г. Вопросы географии Сибири. Сборник 3. – Томск: Изд-во Томского государственного ун-та, 1953. – 214 с.
16. Карта Новосибирской области. Барабинский район. Масштаб 1: 200 000. – ПО «Инженерная геодезия» Роскартографии, 1997.
17. Почвенная карта Новосибирской области. Масштаб 1: 400 000. – Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР, 1987.
18. Еловская Л. Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. – Якутск: Изд-во Якутского филиала СО АН СССР, 1987. – 172 с.
19. Десяткин Р. В. Почвы аласов Лено-Амгинского междуречья. – Якутск: Изд-во Якутского филиала СО АН СССР, 1984. – 168 с.
20. Саввинов Д. Д., Миронова С. И., Босиков Н. П. и др. Аласные экосистемы: структура, функционирование, динамика. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
21. Якутин М. В., Пучнин А. Н. Мониторинг термокарстовых образований в Центральной Якутии с использованием методов дистанционного зондирования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 1. – С. 29–34.
22. Пульсирующее озеро Чаны [Отв. ред. Н. П. Смирнова, А. В. Шнитников]. – Л.: Наука, 1982. – 304 с.
23. Попова А. И., Трофимова В. Т. Прогноз изменения природных условий Западной Сибири. – М.: МГУ, 1988. – 236 с.
24. Шнитников А. В. Озера Срединного региона (историческая изменчивость и современное состояние). – Л.: Наука, 1976. – 559 с.
25. Тарко А. М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. – М.: «Физматлит», 2005. – 232 с.
26. Houghton R. A., Woodwell G. M. Global climatic change // Scientific American. – 1989. – Арг. – Р. 36–44.
27. Кислов А. В. Изменения и изменчивость глобального климата / Современные глобальные изменения природной среды. В 2-х томах. Т. 1. – М.: Научный мир, 2006. – С. 118–129.
28. Щадрина Е. Г., Вольперт Я. Л., Данилов В. А. Биоиндикация воздействия горнодобывающей промышленности на наземные экосистемы Севера: Морфогенетический подход. – Новосибирск: Наука, 2003. – 110 с.
29. Якутин М. В., Анопченко Л. Ю. Использование карт разных годов издания в анализе темпов обсыхания озерной системы Чаны-Абышкан-Сумы-Чебаклы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 2. – С. 56–59.

## REFERENCES

1. World water balance and water resources of the Earth (1974). Leningrad: Hydrometeoizdat, 638 p. [in Russian].
2. Lvovich M. I. (1974). World water resources and their future. Moscow: Mysl', 448 p. [in Russian].
3. Klige R. K. (1985). Changes in global water exchange. Moscow: Nauka press, 247 p. [in Russian].
4. Voskresensky K. P. (1974). Water balance and water resources of the land / World water balance and water resources of the Earth. Leningrad: Hydrometeoizdat, P. 490–497 [in Russian].
5. Klige R. K., Evseeva L. S. (2006). Anomalies of mode waters / Modern global changes of natural environment. In 2 Vol. – Vol.1, [Executive ed. N. S. Kasimov, R. K. Klige]. Moscow: Nauka press, P. 246–269 [in Russian].
6. Zyatkova L. K., Elepov B. S. (2007). At the forefront of the aerospace monitoring of natural environment. Novosibirsk: SSGA Press, 380 p. [in Russian].
7. Vinogradov B. V. (1984). Aerospace monitoring of ecosystems. Moscow: Nauka press, 320 p. [in Russian].
8. Savinykh V. P., Krapivin V. F., Potapov I. I. (2007). Information technologies in environmental monitoring systems. Moscow: Geodezkartizdat, 392 p. [in Russian].
9. Chandra A. M., Ghosh S. K. (2008). Remote sensing and geographical information system. Moscow: Technosphere, 312 p. [in Russian].
10. Bosikov N. P. (1978). Alasnost in Central Yakutia / Geocryological conditions in the mountains and on the plains of Asia. Yakutsk: Publishing house of the Institute of permafrost SB RAS, P. 113–118 [in Russian].
11. Nikolaev V. A. (1986). Cartographic methods in scientific researches. Novosibirsk: Nauka press, 96 p. [in Russian].
12. Berlyant A. M. (1988). The cartographic method of research. Moscow: Moscow state University Publishing house, 252 p. [in Russian].
13. The Chany lake on the map of the Kolivan Department. (1786). Scale: 15 miles to the inch. Archive of the main staff, Map № 384 [in Russian].
14. Yadrintsev N. M. (1887). Map of the lakes Chany, Sumy, Abiscan. Tobolsk and Tomsk provinces. The condition of the area in 1880, Scale: in the English inch to 10 versts // News of the Imperial Geographical society. Vol. 22. Sankt-Petersburg, 676 p. [in Russian].
15. Thcmodanov S. G. (1953). Questions of geography of Siberia. Compilation 3, Tomsk: Publishing House of Tomsk state University, 214 p. [in Russian].
16. Map of Novosibirsk region. Barabinskiy district. Scale 1: 200 000. (1997). Roscartography: Engineering geodesy press [in Russian].
17. Soil map of the Novosibirsk region. Scale 1: 400 000. (1987). Main Department of geodesy and cartography under the Council of Ministers of the USSR [in Russian].
18. Elovskaya L. G. (1987). Classification and diagnosis of permafrost soils of Yakutia. Yakutsk: Publishing house of the Yakut branch of the SB AS USSR, 172 p. [in Russian].
19. Desyatkin R. V. (1984). Soil of alas of the Lena-Amga interfluve. Yakutsk: Publishing house of the Yakut branch of the SB AS USSR, 168 p. [in Russian].
20. Savvinov D. D., Mironova S. I., Bosikov N. P. et al. (2005). Alass ecosystems: structure, functioning, dynamics. Novosibirsk: Nauka press, 264 p. [in Russian].
21. Yakutin M. V., Puchnin A. N. (2010). Monitoring thermokarst formations in Central Yakutia with the use of remote sensing techniques // Proceedings of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography, № 1, P. 29–34 [in Russian].
22. Pulsating lake Chany (1982). [Ed. N. P. Smirnov, A. V. Shnitnikov]. Leningrad: Nauka press, 304 p. [in Russian].

23. Popova A. I., Trofimov V. T. (1988). The forecast of change of natural conditions of Western Siberia. Moscow: Moscow state University Publishing house, 236 p. [in Russian].
24. Shnitnikov A.V. (1976). Lakes of the Middle region (historical variability and current state). Leningrad: Nauka press, 559 p. [in Russian].
25. Tarko A. M. (2005). Anthropogenic changes in global biospheric processes. Mathematical modeling. Moscow: Fizmatlit press, 232 p. [in Russian].
26. Houghton R. A., Woodwell G. M. (1989). Global climatic change // Scientific American, Apr., P. 36–44.
27. Kislov A.V. (2006). Changes and variability of global climate / Modern global changes of natural environment. In 2 Vol. – Vol.1. Moscow: Scientific world, P. 118–129 [in Russian].
28. Shadrina E. G., Volpert Ya. L., Danilov V. A. (2003). Bioindication of the impact of mining on terrestrial ecosystems of the North: Morphogenetic approach. Novosibirsk: Nauka press, 110 p. [in Russian].
29. Yakutin M. V., Anopchenko L. Yu. (2017). The use of maps of different years of publication in the analysis of the rate of desiccation of the lake system Chany-Abiscan-Sumy-Chebakly // News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography, № 2, P. 56–59 [in Russian].

© М. В. Якутин, Л. Ю. Анопченко, А. Н. Пучнин, 2018

## **ЗАПАСЫ ПОЧВЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В МОНИТОРИНГЕ АЛАСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЛЕНО-ВИЛЮЙСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ**

*Александр Николаевич Пучнин*

Якутская государственная сельскохозяйственная академия, 677007, Россия, г. Якутск, ул. Красильникова, 15, ассистент кафедры природообустройства, тел. (411)235-78-45, e-mail: puchninsasha@rambler.ru

*Михаил Владимирович Якутин*

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, тел. (383)363-90-25, e-mail: yakutin@issa.nsc.ru; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, профессор кафедры экологии и природопользования

Исследование посвящено оценке запасов почвенного органического вещества в экосистемах аласов Лено-Виллюйского междуречья. Дается анализ закономерности изменения этого показателя в процессе эволюции аласных почв. Наибольшее количество гумуса сосредоточено в верхнем слое изученных почв. Во всех исследованных почвах содержание углерода не зависело от характера антропогенной нагрузки, но содержание углерода в лугово-черноземной и черноземно-луговой почвах в неиспользуемых аласах оказалось более высоким, чем в аналогичных почвах аласов, находящихся в условиях интенсивного сельскохозяйственного использования. Это позволяет говорить о возможности изученного показателя в экологическом мониторинге степени антропогенной трансформации травяных экосистем.

**Ключевые слова:** алас, почва, органическое вещество, луговые экосистемы, сельскохозяйственное использование, экологический мониторинг.

## **STOCKS OF SOIL ORGANIC MATTER IN MONITORING OF ALAS ECOSYSTEMS IN THE LENA-VILYUI INTERFLUVE**

*Alexander N. Puchnin*

Yakutsk State Agricultural Academy, 677007, Russia, Yakutsk, 15 Krasilnikova St., Assistant, Department of Natural Arrangement, phone: (411)235-78-45; e-mail: puchninsasha@rambler.ru

*Mikhail V. Yakutin*

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Associate Professor, Leading Researcher, Biogeocenology Laboratory, phone: (383)363-90-25, e-mail: yakutin@issa.nsc.ru; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor, Department of Ecology and Environmental Management

The study is devoted to the evaluation of soil organic matter reserves in the ecosystems of alass of the Lena-Vilyui interfluve. The analysis of regularity of change of this index in the course of evolution of alass soils is given. The largest amount of humus is concentrated in the upper layer of the studied soils. In all investigated soils the carbon content did not depend on the nature of anthropogenic load, but the carbon content in meadow-chnozem and chnozem-meadow soils in unused alas was higher than in similar alas soils under intensive agricultural use. This suggests the

possibility of the studied indicator in the environmental monitoring of the degree of anthropogenic transformation of grass ecosystems.

**Key words:** alas, soil, organic matter, meadow ecosystems, agricultural use, environmental monitoring.

### *Введение*

Специфику воздействия человека на компоненты биосферы определяют природные условия Севера, связанные с его высокоширотным положением, – низкие температуры, наличие многолетнемерзлых пород, небольшая продуктивность ценозов и их пониженная устойчивость к повреждающим факторам [1]. Традиционное северное природопользование в своем первоначальном виде основывалось на бережном использовании природы, и благополучие северных народов полностью зависело от емкости природной среды. Извлечение природного вещества не должно было превышать допустимого, обеспечивающего будущую продуктивность уровня. Этот допустимый уровень установился опытом многих поколений людей, познавших особенности природы таежной и тундровой зон. Отсутствие технических средств производства обуславливало то, что удовлетворение потребностей достигалось огромным трудом. Отсутствие ксенобиотиков и других материалов и веществ, сопутствующих техническому прогрессу, рассредоточенность населения и скота исключали загрязнение природной среды, а отходы жизнедеятельности человека и скота легко утилизируются самой природой. Дисперсное расселение позволяло якутским скотоводам сохранять возможность естественного самовосстановления урожайности кормовых угодий, удерживать хрупкое экологическое равновесие природы Якутии в течение нескольких веков, вплоть до середины XX века [2].

В Центральной Якутии преобладает аласно-таежная форма природопользования. Пастбищно-луговое землепользование и основанное на нем хозяйство на протяжении веков являлось экологически сбалансированным и вплоть до первых десятилетий XX в. не сопровождалось острыми кризисными явлениями в состоянии земель и почв. Такие явления стали нарастать, главным образом, со второй половины XX в. в связи с процессами индустриализации экономики и существенными изменениями в системе хозяйствования [3]. Основные сенокосные и пастбищные угодья расположены на аласных и приозерных лугах. Особенно широко они представлены в Лено-Амгинском и Лено-Вилуйском междуречьях, где занимают 30–40 % всей площади и создают своеобразный таежно-аласный ландшафт. Выпас и перевыпас являются одним из ведущих видов антропогенного воздействия на растительность в условиях аласных экосистем. Влияние выпаса на травостой многостороннее и сильнее, чем сенокосение, оно проявляется на фитоценозе прямо (через отчуждение надземных частей вплоть до полного уничтожения естественного покрова) и косвенно (путем уплотнения почвы и изменения водно-воздушного и соле-

вого режимов). Известно, что ухудшение агрегированности почвы способствует сокращению объема пор, по которым происходит инфильтрация в почву и аэрация. Последнее, как известно, отрицательно сказывается на плодородии почв [3, 4].

Гумус является наиболее мощным фактором поглотительной способности почв. Его наиболее устойчивые компоненты – гумусовые вещества – содержат большое число функциональных групп, имеющих сильное сродство к ионам металлов [5]. В гумусе содержится до 98 % почвенного азота, 60 % фосфора и 80 % серы [6]. В гумусовой оболочке почв наряду с ясно выраженной биогенной аккумуляцией таких основных макроэлементов, как С, О, Н, S, Р, N, Са, К, Fe происходит отчетливо выраженная аккумуляция микроэлементов: Zn, Cu, Ni, Mo, Pb. Чем больше процент содержания гумуса в почвах, тем в большей степени накапливаются в гумусовой оболочке Ni, Zn, Cu [5]. Компоненты органического вещества влияют на температурный и водный режимы, увеличивают емкость катионного обмена и служат резервом питательных элементов, являются фактором образования почвенной структуры, и стимулируют рост и развитие растений [7].

Содержание гумуса возрастает от Южной тундры с глеевато-слабоподзолистыми почвами до лесостепи с черноземами оподзоленными и выщелоченными, затем идет снижение его до каштановых почв сухой степи [8]. Зональные мерзлотные палевые почвы по содержанию гумуса относятся к низкогумусным, в их тонком гумусово-аккумулятивном горизонте содержание гумуса – до 4 %. Вниз по профилю содержание гумуса резко снижается, в горизонтах В и С его количество не превышает 1,0–1,5 %. Под влиянием аласного процесса за счет деятельности первичных и остаточных термокарстовых озер идет изменение содержания и состава органического вещества в почвах аласов [9]. Содержание гумуса в почвах аласов резко возрастает. Это происходит как за счет присутствия в составе почвообразующих пород аллохтонных слоев озерного и фитогенного органогенного материала, так и в результате активного протекания дернового и гумусового процессов под различными ассоциациями луговой растительности после выхода донных отложений озер на дневную поверхность. В результате такой комбинированной озерно-почвенной аккумуляции органического материала в почвах аласов, содержание гумуса в гумусово-аккумулятивных горизонтах почв высокое. Как правило, почвы, испытавшие в своем недавнем развитии озерную фазу, в верхней части профиля содержат перегнойные или торфяные горизонты, где содержание гумуса возрастает соответственно до 20–25 и более 30 % [10].

В связи с возросшим антропогенным прессом на экосистемы Центральной Якутии все более актуальным становится детальное изучение фактического состояния природных экосистем, оценка и прогноз их дальнейшего изменения, а также разработка методов комплексного мониторинга аласных экосистем. И одним из важнейших факторов плодородия аласных почв является запас почвенного органического вещества.

## Объекты и методы

Исследование проведено в междуречье рек Лена и Вилюй. Для рельефа Лено-Вилюйской (Центрально-Якутской) равнины характерно множество неглубоких аласных и мелкодолинных форм. Аласы имеют вытянутую долинообразную форму и состоят из чередующихся цепей ложбин, соединяющихся между собой мелкими травяными речками. Большинство из них имеют небольшие размеры и находятся в различных стадиях развития. Преобладают сапропелевые сухие и полноводные аласы [10]. В качестве объектов исследования в Горном районе республики Саха (Якутия) были выбраны наиболее типичные почвы для Центральной Якутии: зональная мерзлотная палево-бурая типичная почва и три мерзлотных почвы аласов Хоту, Элэннэх, От-урях, Май. Выбранные для исследования почвы каждого аласа находятся на одной катене: лугово-черноземная, черноземно-луговая и торфянисто-глеевая. Все исследованные экосистемы используются в качестве сенокосов.

Алас Хоту расположен в 32 км на северо-запад от поселка Асыма. Вокруг аласа растет березово-лиственнично-кустарничковый лес. Все изученные почвы расположены в аласе Хоту на его юго-юго-западном склоне на одной катене длиной около 150 м. Перепад высот от Т. 1 до Т. 4 составляет около 4 м. Алас Элэннэх расположен в 1 км к западу от села Бердигестях. Вокруг аласа растет березово-лиственнично-кустарничковый лес. Все почвы, изученные в аласе Элэннэх, расположены на одной катене длиной около 60 м. Перепад высот от Т. 1 до Т. 3 составляет около 5 м. Алас От-урях расположен в 12 км к северу от села Бердигестях. Вокруг аласа растет лиственнично-кустарничково-кустарничковый лес. Все почвы, изученные в аласе От-урях, расположены на одной катене длиной около 100 м. Перепад высот от Т. 1 до Т. 4 составляет около 3 м. Алас Май расположен в 5 км к юго-юго-западу от села Бердигестях. Вокруг аласа растет березово-лиственнично-кустарничковый лес. Все почвы, изученные в аласе Май, расположены на одной катене длиной около 100 м. Перепад высот от Т. 1 до Т. 4 составляет около 3 м. В качестве примера на рисунке 1 приведена схема ландшафтного профиля аласа Хоту, а в табл. 1 приведены основные характеристики аласа.

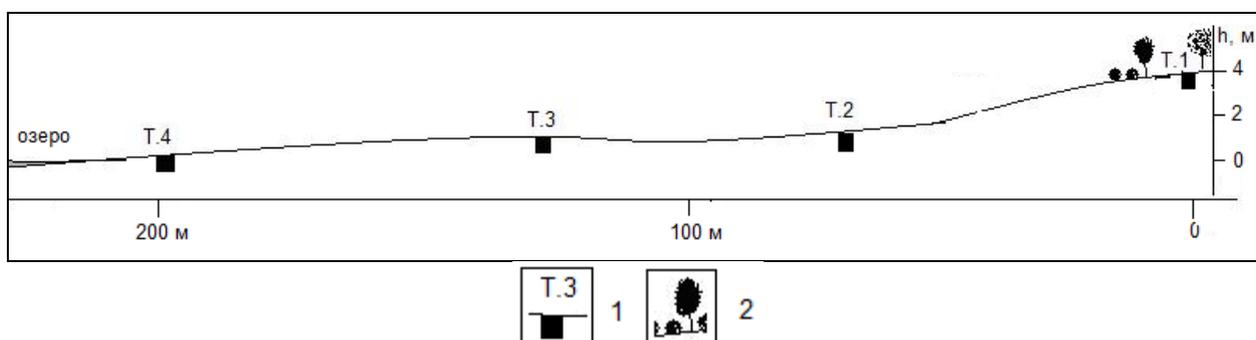


Рис. 1. Схема ландшафтного профиля аласа Хоту  
(1 – точки отбора проб, 2 – лес)

## Основные характеристики исследованных экосистем аласа Хоту

№ п/п	Геоморфологическое положение	Экосистема, проективное покрытие, % / высота травостоя, см	Почва	Сельхоз использование
Т. 1	Граница аласа. Бровка уступа	Березово-лиственничный лес	Мерзлотная палево-бурая типичная	–
Т. 2	Пологий склон от леса к озеру (крутизна склона 10°)	Разнотравно-злаковый остепненный луг, 80 / 40	Мерзлотная аласная лугово-черноземная	Сенокос
Т. 3	Поверхность слабо-наклонная к озеру	Разнотравно-злаковый мезофитный луг, 80 / 40	Мерзлотная аласная черноземно-луговая	Сенокос
Т. 4	В 20 м от уреза воды. Днище аласа	Осоковый заболоченный луг, 100 / 55	Мерзлотная аласная торфянисто-глеевая	–

Влажность почвы определялась общепринятым методом, определение содержания углерода в почве проводилось методом мокрого сжигания по Тюрину [11].

### Результаты

Характерной особенностью всех исследованных почв является сосредоточение  $C_{орг}$  в верхнем горизонте и резкое уменьшение вниз по профилям почв (рис. 2). Наименьшее содержание  $C_{орг}$  наблюдается в палево-бурой типичной почве. При переходе от мерзлотной палево-бурой типичной почвы к аласной лугово-черноземной содержание  $C_{орг}$  в верхнем горизонте (0–10 см) увеличивается в 2 раза, а в горизонте 10–20 см – в 3,2 раза.

На стадии эволюции мерзлотной аласной черноземно-луговой почвы, (Т. 3) благоприятные водно-физические условия способствуют активизации комплекса деструкторов и происходит минерализация запасов торфа, оставшегося от болотной стадии, содержание  $C_{орг}$  в горизонте 0–10 см увеличивается в 2 раза по сравнению с лугово-черноземной почвой, но если сравнивать с торфянисто-глеевой почвой, то содержание  $C_{орг}$  снижается в 2,7 раза. Влияние комплексов факторов, определяемых типом и слоем почвы на  $C_{орг}$ , было значимым на всех стадиях эволюции почв, но особенно сильным – при переходе от «земноводной» болотной стадии к «сухопутной» луговой (рис. 3).

Во всех исследованных почвах содержание углерода не зависело от характера антропогенной нагрузки. Наибольшее содержание углерода отмечалось в аласе Хоту (жестко регулируемое пастбище). В аласах более подверженных антропогенной нагрузке, Май и Элэннэх, содержание углерода низкое, тогда как в неиспользуемом аласе От-урях содержание углерода в лугово-черноземной и черноземно-луговой почвах оказалось более высоким, чем в аналогичных почвах остальных исследованных аласов (рис. 4).

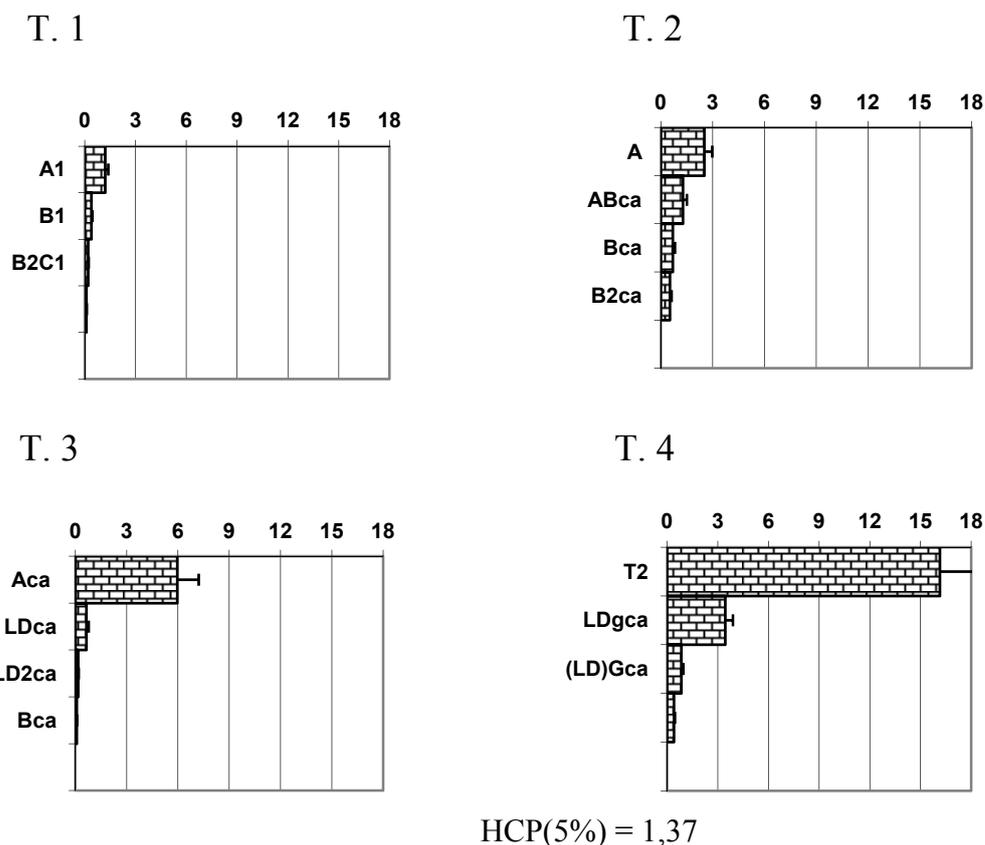


Рис. 2. Профильное распределение  $C_{орг}$  (%) в исследованных мерзлотных почвах: палево-бурой типичной (Т. 1), аласной лугово-черноземной (Т. 2), аласной черноземно-луговой (Т. 3) и аласной торфянисто-глеевой (Т. 4)

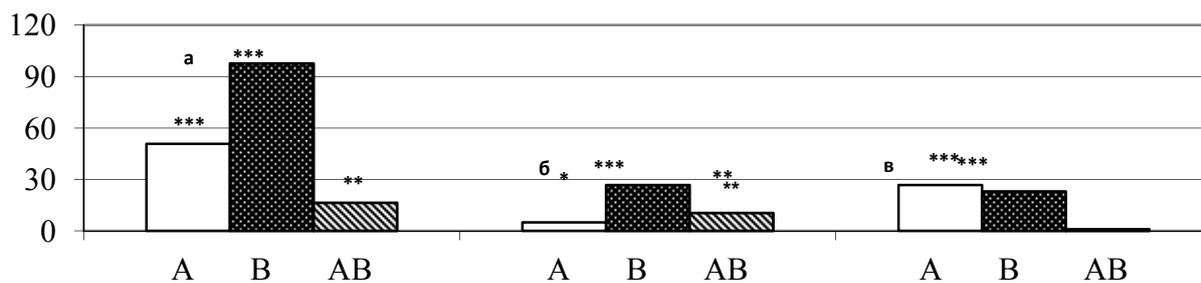


Рис. 3. Значения F-критерия для различных факторов, влияющих на  $C_{орг}$  на разных стадиях эволюции аласных почв: а – при переходе от торфянисто-глеевой почвы к черноземно-луговой; б – при переходе от черноземно-луговой почвы к лугово-черноземной; в – при переходе от лугово-черноземной почвы к палево-бурой типичной. (А – тип почвы, В – слой почвы, АВ – взаимодействие факторов; \* –  $p < 0,05$ , \*\* –  $p < 0,01$ , \*\*\* –  $p < 0,001$ )

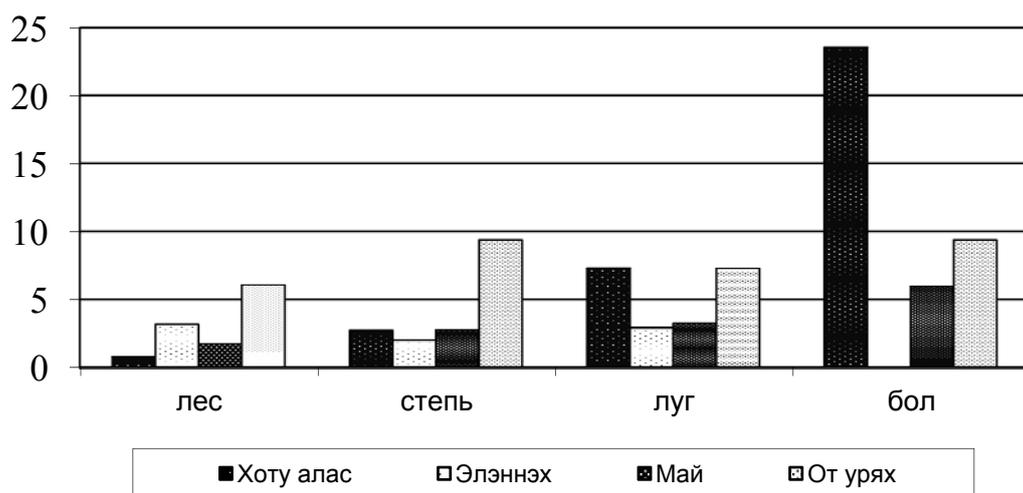


Рис. 4. Содержание углерода (%) в почвах исследованных аласных экосистем (горизонт 0–10 см)

### Обсуждение

Современные почвы аласов – это не только результат развития современных элементарных процессов почвообразования и их сложного сочетания, но и итог воздействия на них предыдущих фаз эволюции, обусловленных аласным процессом. Почвы аласов – это сложное сочетание основных факторов почвообразования и аласного седиментоза, чередование процессов аккумуляции карбонатов, оглеения, торфонакопления, сопровождающееся частой сменой восстановительных и окислительных условий, соответствующих стадиям развития аласов. Параллельно происходит формирование почв межаласных пространств, которые под влиянием более засушливых условий развиваются на повышенных, по сравнению с аласными котловинами, элементах рельефа под пологом лиственнично-брусничной травянистой тайги в условиях надмерзлотного непромывного водного режима [12].

Сукцессия аласных экосистем Центральной Якутии от тайги через озерную и болотную стадии к луговой степи сопряжена с эволюцией почв. При переходе от зональных мерзлотных палевых таежных почв к аласной торфянисто-глеевой происходит резкое увеличение запасов органического вещества. В процессе эволюции аласных почв от болотных почв к луговым и далее к остепненным происходит уменьшение запасов  $C_{орг}$ . Это косвенно свидетельствует о существенных перестройках основного компонента деструкционного звена биологического круговорота – комплекса почвенных микроорганизмов – при переходе от одной стадии эволюции аласной экосистемы к другой.

На территории Центральной Якутии на протяжении последних 15 лет наблюдается устойчивая тенденция к увеличению среднемесячных температур воздуха и суммарного количества осадков в наиболее теплые месяцы года

с июля по сентябрь. При этом происходит незначительный общий рост количества осадков. При сохранении этих тенденций мы вправе ожидать увеличения скоростей деградации ледового комплекса и общую активизацию процессов, ведущих к эволюционной замене зональных палевых мерзлотных почв аласными почвами [13].

### *Заключение*

Таким образом, проведенное исследование позволило оценить запасы почвенного органического вещества в экосистемах аласов Лено-Виллюйского междуречья и проследить закономерности его изменения в процессе эволюции аласных почв. Анализ профильного распределения этого вещества продемонстрировал, что наибольшее количество  $C_{\text{орг}}$  сосредоточено в верхнем, 0–10 см, слое почв. Во всех исследованных почвах содержание углерода не зависело от характера антропогенной нагрузки, но содержание углерода в лугово-черноземной и черноземно-луговой почвах в неиспользуемых аласах оказалось более высоким, чем в аналогичных почвах аласов, находящихся в условиях интенсивного сельскохозяйственного использования. Это позволяет говорить о возможности использования показателей запасов почвенного органического вещества в экологическом мониторинге для анализа не только стадий эволюции аласных экосистем, но и степени антропогенной трансформации травяных экосистем.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Москаленко Н. Г. Антропогенная динамика растительности равнин криолитозоны России. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 280 с.
2. Поисеев И. И. Устойчивое развитие Севера: эколого-экономический аспект. – Новосибирск: Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 280 с.
3. Саввинов Г. Н. Эколого-почвенные комплексы Якутии. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 312 с.
4. Миронова С. И., Гаврильева Л. Д. К проблемам сельскохозяйственной рекультивации в Центральной Якутии / Теоретические и прикладные вопросы луговедения и луговодства : сборник научных трудов. – Вып. 1. – Якутск: Якутский филиал Изд-ва СО РАН, 2002. – С. 33–38.;
5. Шихова Л. Н., Егошина Т. Л. Тяжелые металлы в почвах и растениях таежной зоны Северо-Востока Европейской России. – Киров: Зональный НИИСХ Северо-востока, 2004. – 264 с.
6. Черников В. А., Милащенко Н. З., Соколов О. А. Устойчивость почв к антропогенному воздействию. – Т. 3. / Экологическая безопасность и устойчивое развитие. – Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. – 203 с.
7. Багаутдинова Ф. Я., Хазис Ф. Х. Состав и трансформация органического вещества почв. – Уфа: Гилем, 2000. – 197 с.
8. Кленов Б. М. Устойчивость гумуса автоморфных почв Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. – 176 с.
9. Десяткин Р. В. Специфика почвообразования в аласах // Почвоведение. – 1990. – № 12. – С. 5–15.

10. Десяткин Р.В. Почвообразование в термокарстовых котловинах – аласах криолитозоны. – Новосибирск: Наука, 2008. – 324 с.
11. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. – 488 с.
12. Саввинов Д. Д., Сазонов Н. Н. Микроэлементы в северных экосистемах: на примере Республики Саха (Якутия). – Новосибирск: Наука, 2006. – 208 с.
13. Якутин М. В., Пучнин А. Н. Биомасса микроорганизмов в аласных почвах Лено-Вилуйского междуречья // Сибирский экологический журнал. – 2012. – № 5. – С. 677–683.

## REFERENCES

1. Moskalenko N. D. (1999). Anthropogenic vegetation dynamics of the cryolithozone plains of Russia. Novosibirsk: Nauka press. Siberian publishing firm of RAS, 280 p. [in Russian].
2. Poiseev I. I. (1999). Sustainable development of the North: ecological and economic aspect. Novosibirsk: Siberian publishing firm of RAS, 280 p. [in Russian].
3. Savvinov G. N. (2007). Ecological and soil complexes of Yakutia. Moscow: Nedra-business center press, 312 p. [in Russian].
4. Mironov S. I., Gavrilieva L. D. (2002). To the problems of agricultural reclamation in the Central Yakutia / Theoretical and applied questions of the meadow's science and grassland farming. Collection of scientific works. Vol. 1. Yakutsk: Yakutsk branch of SB RAS, P. 33–38. [in Russian].
5. Shikhova L. N., Egoshina T. L. (2004). Heavy metals in soils and plants of the taiga zone of the northeast of European Russia. Kirov: Zonal research institute of agriculture of the northeast, 264 p. [in Russian].
6. Chernikov V. A., Malashenko N. Z., Sokolov O. A. (2001). The resistance of soils to anthropogenic impacts. Vol. 3. / Environmental safety and sustainable development. Pushchino: Publishing house of Pushchino research center of RAS, 203 p. [in Russian].
7. Bagautdinova F. J., Hasis F. H. (2000). The composition and transformation of soil organic matter. Ufa: Gilem, 197 p. [in Russian].
8. Klenov B. M. (2000). Humus stability of automorphic soils of Western Siberia. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, branch «Geo», 176 p. [in Russian].
9. Desyatkin R. V. (1990). Specificity of soil formation in alas // Eurasian soil science, № 12, P. 5–15. [in Russian].
10. Desyatkin R. V. (2008). Soil formation in thermokarst depressions – alass of the permafrost zone. Novosibirsk: Nauka press, 324 p. [in Russian].
11. Arinushkina E. V. (1970). Manual on chemical analysis of soils. Moscow: Moscow University press, 488 p. [in Russian].
12. Savvinov D. D., Sazonov N. H. (2006). Trace elements in northern ecosystems: the example of the Republic of Sakha (Yakutia). Novosibirsk: Nauka press, 208 p. [in Russian].
13. Yakutin M. V., Puchnin A. N. (2012). Biomass of microorganisms in alas soils of the Lena-Vilyui interfluvium // Siberian ecological journal, № 5, P. 677–683. [in Russian].

© А. Н. Пучнин, М. В. Якутин, 2018

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ NDVI ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

***Татьяна Олеговна Перемитина***

Институт химии нефти СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 4, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефти», тел. (3822)49-22-27, e-mail: pto@ipc.tsc.ru

***Ирина Германовна Яценко***

Институт химии нефти СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 4, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лаборатории «Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефти», тел. (3822)49-18-11, e-mail: sric@ipc.tsc.ru

Продемонстрирована возможность изучения динамики растительности труднодоступных нефтедобывающих территорий Западной Сибири с применением свободно распространяемых спутниковых снимков среднего пространственного разрешения MODIS. Для анализа изменения вегетационного индекса были взяты спутниковые данные MOD13Q1 16-Day Vegetation Indices (250 м) за 7-летний период с 2010 г. по 2016 г. В работе пошагово изложен алгоритм обработки спутниковых данных средствами геоинформационной системы ArcGis 10.2.2 и проанализированы значения вегетационных индексов NDVI пяти территорий нефтяных и нефтегазовых месторождений Томской области: Лугинецкое, Оленье, Ломовое, Катыльгинское и Западно-Катыльгинское. Установлено, что для исследуемых территорий тенденция изменения значений индекса однотипна – высокие значения в 2016 г. и минимальные значения в 2012 г. Анализ динамики изменения средних значений нормализованного вегетационного индекса NDVI показал улучшение состояния растительного покрова с 2012 г. на всех исследуемых территориях.

**Ключевые слова:** динамика растительности, спутниковые данные, вегетационный индекс, геоинформационные системы, месторождения нефти, окружающая среда.

## **EVALUATING THE DYNAMICS OF VEGETATION OF OIL-EXTRACTING TERRITORIES IN WESTERN SIBERIA BASED ON VEGETATION NDVI INDICES**

***Tatiana O. Peremitina***

Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Prospect Akademichesky St., Tomsk, 634055, Russia, Ph. D., Researcher Laboratory, phone: (3822)49-18-11, e-mail: pto@ipc.tsc.ru

***Irina G. Yashchenko***

Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Prospect Akademichesky St., Tomsk, 634055, Russia, Ph. D., Head of Laboratory, phone: (3822)49-18-11, e-mail: sric@ipc.tsc.ru

The possibility of studying the dynamics of vegetation in oil-producing areas of Western Siberia using free satellite imagery of the medium spatial resolution MODIS is demonstrated. Satellite data MOD13Q1 16-Day Vegetation Indices (250 m) for the 7-year period from 2010 to 2016 were used to analyze the change in the vegetation index. The step-by-step description of the algorithm for processing of satellite data by means of ArcGis is given. The NDVI values of five territories of hydrocarbon deposits of Tomsk region are analyzed. It is established that for the study areas the trend

of changing the values of the index is the same - high values in 2016 and minimum values in 2012. Analysis of the dynamics of changes in the average values of the normalized vegetation index NDVI showed an improvement in the state of vegetation cover from 2012 in all of the study areas.

**Key words:** vegetation dynamics, satellite data, vegetation index, geoinformation systems, oil fields, environment.

### *Введение*

Уже более пятидесяти лет Россия является одним из крупнейших мировых лидеров по добыче и экспорту нефти. Согласно данным ежегодного статистического отчета международной организации стран-экспортеров нефти «Organization of the Petroleum Exporting Countries» (ОПЕК) [1] в 2016 г. мировая добыча нефти увеличилась на 0,35 млн. баррелей в день (б./д.) или на 0,5 % по сравнению с 2015 г. По данным за 2016 г. в тройку лидеров вошли следующие страны-производители нефти: Саудовская Аравия (10,46 млн. б./д.), Россия (10,29 млн. б./д.) и США (8,88 млн. б./д.).

Западная Сибирь является наиболее развитым и богатым нефтью и газом регионом России. Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн расположен на территории Западно-Сибирской равнины, и охватывает такие российские регионы, как Новосибирская, Омская, Тюменская, Томская, Ханты-Манский АО, Ямало-Ненецкий АО.

Третьим по значимости нефтедобывающим регионом России в Западной Сибири является Томская область, причем объем еще неразведанных нефтяных ресурсов, по последним оценкам (на основании геологического прогноза), превышает разведанные примерно в 1,8 раза и позволяет сделать вывод о том, что нефтедобыча в Томской области будет продолжаться еще много лет [2].

Государственные власти несут ответственность за мониторинг и обеспечение соблюдения природоохранного законодательства, разработку стратегий для энергетического сектора. Однако приватизация нефтяного сектора передала ответственность за прошлые и текущие экологические и социальные воздействия нефтегазового сектора руководству российских и иностранных нефтяных компаний, эксплуатирующих месторождения [3].

В настоящее время при оценке состояния окружающей среды используют различные методы получения информации: наземные данные, данные аэросъемки и спутниковые данные. Однако большая площадь территории Западной Сибири относится к так называемым «труднодоступным территориям», где возникают трудности с наземными наблюдениями по экономическим соображениям [4–5]. Вследствие перечисленных выше особенностей исследуемых территорий актуально проанализировать возможность оценки состояния растительного покрова с использованием свободно распространяемых спутниковых данных.

Целью данной работы является изучение возможностей анализа и мониторинга состояния растительного покрова нефтегазодобывающих территорий Западной Сибири, основанных на спутниковых снимках среднего пространствен-

ного разрешения, которые сочетают в себе преимущества свободного (бесплатного) доступа к данным и приемлемое для обнаружения изменений состояния растительного покрова пространственное разрешение.

### *Методы и материалы*

Перечисленным выше требованиям к спутниковым данным удовлетворяют данные спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на борту спутников Terra и Aqua. Съемка ведется в 36 спектральных каналах в оптическом диапазоне спектра с разрешением от 250 до 1000 м. Два спектральных канала в красной и ближней инфракрасной зонах с пространственным разрешением 250 м [6–7]. Широкая полоса обзора обеспечивает возможность ретроспективного анализа состояния территории Томской области за период 2000–2016 гг. В данной работе использованы специализированные продукты MOD13Q1, содержащие значения вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), которые формируются раз в 16 дней [8].

Расчет индекса NDVI основан разнице отражения в ближней инфракрасной области спектра отражения и в красной части электромагнитного спектра [9–11]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR – коэффициент отражения в ближней инфракрасной области спектра;  
RED – коэффициент отражения в красной области спектра.

Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных участках кривой спектральной отражательной способности растений, где на красную зону спектра приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. Таким образом, разница в отражающей способности позволяет выделить: территории без растительного покрова, территории с фотосинтетически неактивной растительностью, или территории с фотосинтетически активной растительностью. Для интерпретации рассчитанных значений используется дискретная шкала, где значения NDVI меняются в диапазоне от –1 до 1. Для высокой и средней степени развития зеленой биомассы значения NDVI изменяются в диапазоне от 0,4 до 1,0 и не могут быть меньше 0,2. Причинами значений NDVI ниже нуля в летний период съемки могут являться облачность или водоемы [12–16].

Таким образом, анализ значений индекса NDVI помимо определения зон с угнетенной растительностью позволяет дополнительно определять изменения объемов фитомассы на исследуемой территории.

## Результаты и обсуждение

Весь процесс обработки и анализа данных можно представить в виде алгоритма последовательных действий [17]:

*Шаг 1.* Формирование коллекции спутниковых данных на исследуемую территорию за многолетний период. В Научно-исследовательском информационном центре Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук сформирована коллекция спутниковых данных MODIS для территории Томской области за период 2000–2016 гг. В данной работе использованы данные MOD13Q1 за период 2010–2016 гг., покрывающие исследуемую территорию Томской области.

*Шаг 2.* Анализ экологических отчетов и статистической информации об аварийных ситуациях на территориях углеводородных месторождений и формирование перечня территорий месторождений нуждающихся в проведении оценки состояния их растительного покрова. В данной работе проанализированы пять территорий нефтяных и нефтегазовых месторождений: Лугинецкое, Оленье, Ломовое, Катильгинское и Западно-Катильгинское месторождения.

Согласно ежегодно представляемым данным государственных докладов о состоянии и охране окружающей среды Томской области основное загрязнение земель и водоемов обусловлено высокой аварийностью на углеводородных месторождениях. Так, например, в 2016 г. на объектах нефтегазодобывающего комплекса зарегистрирован 61 некатегорийный отказ, которые произошли на объектах ОАО «Томскнефть» ВНК (52 отказа на нефтепроводах, 9 – на водоводах). Основное количество отказов произошло в результате коррозии труб и повышения интенсивности эксплуатации месторождений. В табл. 1 представлены собранные данные о количестве отказов на нефтедобывающих объектах с 2010 по 2016 гг. [18–24].

Таблица 1

Количество отказов оборудования  
на исследуемых углеводородных месторождениях Томской области

Число аварий (в год) Месторождение	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1. Лугинецкое	43	28	44	26	15	10	4
2. Оленье	26	22	20	7	7	22	5
3. Ломовое	43	28	44	26	15	10	4
4. Катильгинское	40	69	26	13	9	5	2
5. Западно-Катильгинское	10	25	15	3	6	3	2

*Шаг 3.* Создание средствами геоинформационной системы ArcGis 10.2.2 полигональных векторных слоев исследуемых территорий. В данной работе представлены результаты анализа состояния растительного покрова территорий пяти углеводородных месторождений Томской области с 2010–2016 гг. (рис. 1).

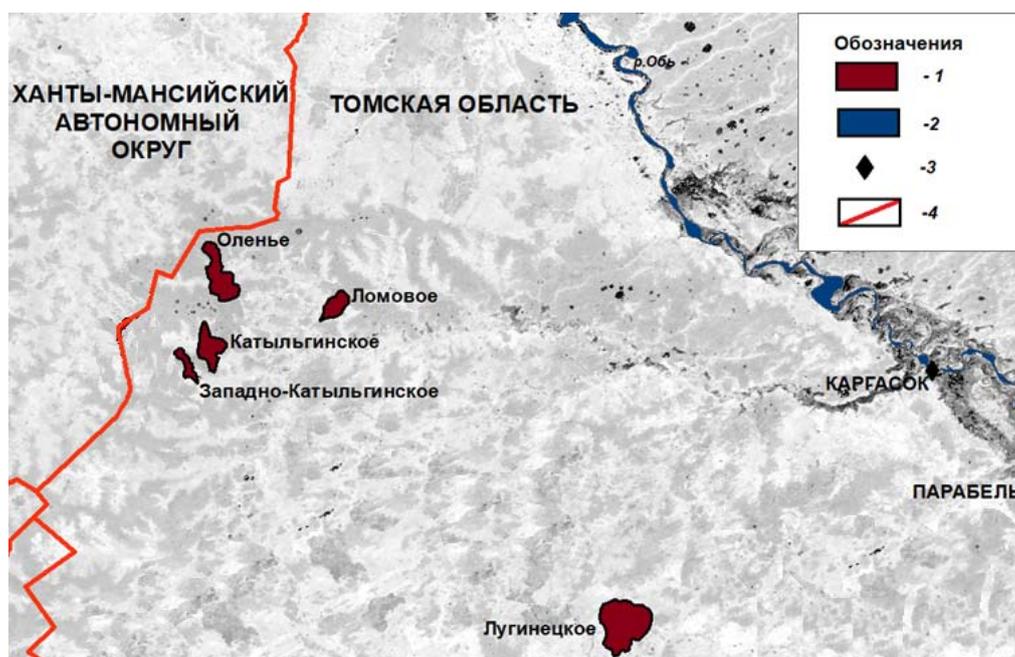


Рис. 1. Исследуемые территории месторождений Западной Сибири: 1 – территории нефтяных и газонефтяных месторождений; 2 – крупные реки; 3 – населенные пункты; 4 – границы административно-территориальных образований

#### *Шаг 4. Анализ и интерпретация полученных результатов.*

Для анализа изменения вегетационного индекса были взяты спутниковые данные MOD13Q1 16-Day Vegetation Indices (250 м) за 7-летний период с 2010 по 2016 гг. для 193 дня в году, т.е. 16-ти дневные усредненные значения с 27 июня по 13 июля для каждого года.

На рис. 2 представлена динамика изменения средних значений нормализованного вегетационного индекса NDVI, рассчитанная с помощью инструмента Зональная статистика (Zonal Statistics) геоинформационной системы ArcGis 10.2.2 по спутниковым данным MOD13Q1 для территорий пяти исследуемых углеводородных месторождений за период с 2010 по 2016 гг.

Установлено, что для пяти территорий углеводородных месторождений тенденция изменения значений индекса однотипна – высокие значения в 2016 г. и минимальные значения в 2012 г. Минимальные значения индекса NDVI получены для растительности на территории Оленьего (0,7320) и Лугинецкого (0,7415) месторождений в 2012 г. Полученные результаты согласуются с данными, приведенными в табл. 1. Так, в 2012 г. на территории Лугинецкого месторождения количество отказов увеличилось с 106 до 144 по сравнению с 2011 г. По данным ОАО «Томскнефть» ВНК [20] в 2012 г. во время отказов из трубопроводов вытекло 8,7 т нефти и 7,8 т высокоминерализованной жидкости. Общая площадь загрязненных земель составила 2,0 га. Наибольшему по площади загрязнению в 2012 г. подверглись земли на Лугинецком месторождении (0,53 га) [20], что и объясняет такое низкое значение индекса NDVI на рис. 2.

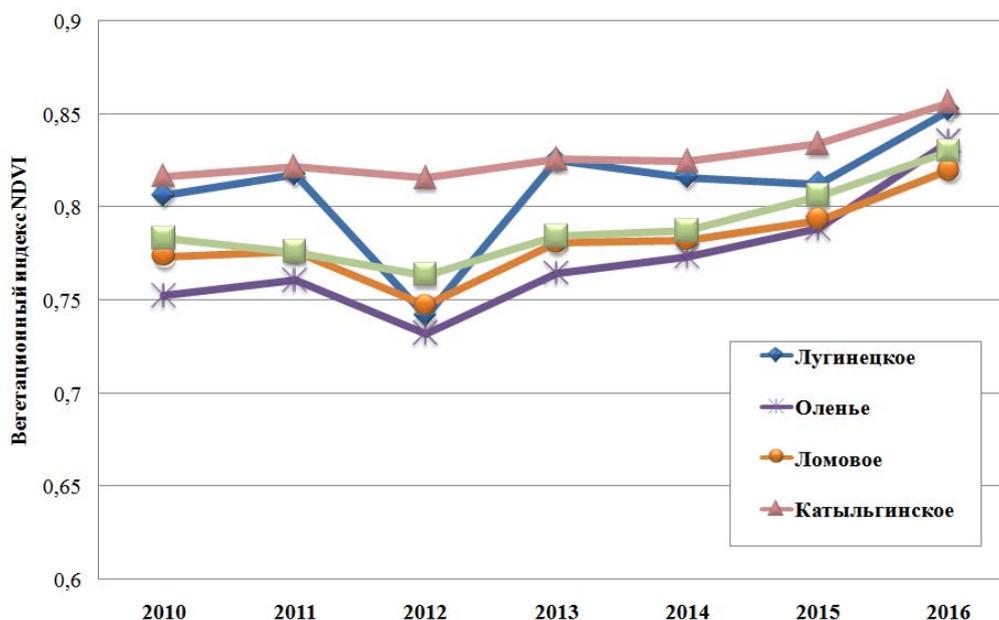


Рис. 2. Динамика изменения средних значений нормализованного вегетационного индекса NDVI

Несмотря на приведенный выше анализ, можно сделать вывод о том, что новая законодательная политика и отслеживание своевременности проведения рекультивационных работ сыграли положительную роль в росте значения индекса NDVI. Согласно представленной ОАО «Томскнефть» ВНК информации, затраты на природоохранные мероприятия в 2012 г., по сравнению с 2011 г., увеличились на 16 %, причем основное увеличение затрат произошло за счет выполнения мероприятий по охране атмосферного воздуха [20]. В целях сокращения загрязнения атмосферного воздуха выбросами загрязняющих веществ в 2012 г. Правительством Российской Федерации принято Постановление № 1148 «Об особенностях исчисления платы за негативное воздействие на окружающую среду при выбросах в атмосферный воздух загрязняющих веществ, образующихся при сжигании на факельных установках и (или) рассеивании попутного нефтяного газа» [25]. Данное постановление заложило основу более осмысленного отношения к состоянию окружающей среды. По полученным графикам динамики изменения средних значений нормализованного вегетационного индекса NDVI (рис. 2) можно установить улучшение состояния растительности с 2012 г. на исследуемых территориях.

### *Заключение*

Рассчитанные значения вегетационных индексов NDVI по спутниковым снимкам согласуются с информацией об аварийности на нефтегазодобывающих территориях Томской области. Таким образом, можно прийти к заключению,

что применение спутниковых данных и ГИС-технологий дают возможность проанализировать состояние растительного покрова труднодоступных нефтегазодобывающих территорий Томской области, проводить картографирование и пространственный анализ труднодоступной болотистой местности, что оказывает значительную помощь в своевременной оценке экологической ситуации и принятии решений в устранении и профилактики загрязнения окружающей среды.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Organization of the Petroleum Exporting Countries [Электронный ресурс]: Annual Statistical Bulletin 2017. – Режим доступа: [http://www.opec.org/opec\\_web/static\\_files\\_project/media/downloads/publications/ASB2017\\_13062017.pdf](http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/ASB2017_13062017.pdf) (дата обращения: 25.03.2018).
2. Структура нефти Западной Сибири [Электронный ресурс]: портал о нефти. – Режим доступа: <https://neftok.ru/strany/neft-zapadnoj-sibiri.html> (дата обращения: 25.03.2018).
3. West Siberia Oil Industry Environmental and Social Profile [Электронный ресурс]: Final Report. – Режим доступа: <http://www.greenpeace.nl/Global/nederland/report/2001/5/west-siberia-oil-industry-envi.pdf> (дата обращения: 25.03.2018).
4. Днепровская В.П., Перемитина Т.О., Яценко И.Г., Оценка индекса NDVI и содержания углеводов в болотных водах на нефтедобывающих территориях Западной Сибири // Вода: химия и экология. – 2017. - № 9. – С. 3-10.
5. Дюкарев Е.А., Алексеева М.Н., Головацкая Е.А. Исследование растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. – 2017. – № 2. – С. 38–51.
6. Официальный сайт радиометра MODIS [Электронный ресурс]: описание системы TERRA и сканера MODIS. – Режим доступа: <http://modis.gsfc.nasa.gov>. (дата обращения: 25.03.2018).
7. MODIS Overview [Электронный ресурс]: MODIS Vegetation Indices. – Режим доступа: [https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis) (дата обращения: 25.03.2018).
8. Nouri H., Anderson S., Sutton P., Beecham S., Naglere P., Jarchow C., Roberts D. NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: An assessment of vegetation in the Adelaide Parklands // Science of The Total Environment. Elsevier. – 2017. – V. 584–585.- P.11-18.
9. Jönsson A., Eklundh L., Hellström M., Barring L., Jönsson P. Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology // Remote Sensing of Environment. – V. 114, 2010. – P. 2719–2730.
10. Liu L., Liang L., Schwartz M., Donnelly A., Wang Z., Schaaf C., Liu L. Evaluating the potential of MODIS satellite data to track temporal dynamics of autumn phenology in a temperate mixed forest // Remote Sensing of Environment. – V. 160, 2015. – P. 156–165.
11. Вегетационные индексы. [Электронный ресурс]: основы, формулы, практическое использование. – Режим доступа: [http://mapexpert.com.ua/index\\_ru.php?id=20&table=news](http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=20&table=news). (дата обращения: 25.03.2018).
12. Козодеров В.В., Кондранин Т.В. Методы оценки почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования : учебное пособие. – М.: МФТИ, 2008. – 222 с.
13. Yengoh G., Dent D., Olsson L., Tengberg A., Tucker C. Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: Current Status, Future Trends, and Practical Considerations // Springer: Berlin, Germany, 2015. – 109 p.
14. Gillespie T., Ostermann-Kelm S., Dong C., Willis K., Okin G., MacDonald G. Monitoring changes of NDVI in protected areas of southern California Ecological Indicators // Elsevier. – 2018. – V. 88. – P. 485-494.

15. Petach A., Toomey M., Aubrecht D., Richardson A. Monitoring vegetation phenology using an infrared-enabled security camera // *Agricultural and Forest Meteorology*. – V.195–196, 2014. – P. 143–151.
16. Kovalev A., Tokareva O. Using MODIS NDVI products for vegetation state monitoring on the oil production territory in Western Siberia // *MATEC Web of Conferences 4*. Сер. "4th Russian Forum for Young Scientists with International Participation "Space Engineering"". – 2016. – С. 05003.
17. Перемитина Т. О., Яценко И. Г., Днепровская В. П. Диагностика состояния и восстановление природных экосистем на объектах нефтегазового комплекса Западной Сибири и прилегающих территориях // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 186–190.
18. Яценко И.Г., Перемитина Т.О. Применение данных спутниковых наблюдений TERRA-MODIS для мониторинга состояния окружающей среды нефтедобывающих территорий Западной Сибири // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2015. – № 12. – С. 42-48.
19. Экологический мониторинг: Доклад о состоянии окружающей среды Томской области в 2011 году: Департамент природн. ресурсов и охраны окружающей среды Том. обл., ОГБУ «Облкомприрода». – Томск: Издательство «Графика ДТР», 2012. – 166 с.
20. Экологический мониторинг: Доклад о состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2012 году: Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области, ОГБУ «Облкомприрода». – Томск: Дельтаплан, 2013. – 172 с.
21. Экологический мониторинг: Доклад о состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2013 году: Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области, ОГБУ «Облкомприрода». – Томск: Дельтаплан, 2014. – 194 с.
22. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2014 году»: Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области, ОГБУ «Облкомприрода». – Томск: Дельтаплан, 2015. – 156 с.
23. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2015 году»: Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области, ОГБУ «Облкомприрода». – Томск: Дельтаплан, 2016. – 156 с.
24. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2016 году»: Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области, ОГБУ «Облкомприрода». – Ижевск: ООО «Принт-2», 2017. – 160 с.
25. Постановление Правительства РФ от 8 ноября 2012 г. N 1148 «Об особенностях исчисления платы за негативное воздействие на окружающую среду при выбросах в атмосферный воздух загрязняющих веществ, образующихся при сжигании на факельных установках и (или) рассеивании попутного нефтяного газа» [Электронный ресурс]: Информационно-правовое обеспечение «Гарант». – Режим доступа: <http://ivo.garant.ru/#/document/70257422/paragraph/1073742591:4> (дата обращения 23.03.2018).

## REFERENCES

1. Organization of the Petroleum Exporting Countries (2017) [Elektronnyj resurs]: Annual Statistical Bulletin 2017. – Rezhim dostupa: [http://www.opec.org/opec\\_web/static\\_files\\_project/media/downloads/publications/ASB2017\\_13062017.pdf](http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/ASB2017_13062017.pdf) (data obrashcheniya: 25.03.2018).
2. Struktura nefti Zapadnoj Sibiri [Elektronnyj resurs]: portal o nefti. – Rezhim dostupa: <https://neftok.ru/strany/neft-zapadnoj-sibiri.html> (data obrashcheniya: 25.03.2018). [in Russian].
3. West Siberia Oil Industry Environmental and Social Profile [Elektronnyj resurs]: Final Report. – Rezhim dostupa: <http://www.greenpeace.nl/Global/nederland/report/2001/5/west-siberia-oil-industry-envi.pdf> (data obrashcheniya: 25.03.2018).

4. Dneprovskaya, V.P., Peremitina, T.O., Yashchenko, I.G. (2017). Ocenka indeksa NDVI i sodержaniya uglevodorodov v bolotnyh vodah na neftedobyvayushchih territoriyah Zapadnoj Sibiri Voda: himiya i ekologiya. Vol. 9, 3-10. [in Russian].
5. Dyukarev, E.A., Alekseeva, M.N., Golovackaya, E.A. Issledovanie rastitel'nogo pokrova bolotnyh ekosistem po sputnikovym dannym (2017). Issledovanie Zemli iz kosmosa. Vol. 2, 38–51. [in Russian].
6. Oficial'nyj sajt radiometra MODIS [Elektronnyj resurs]: opisanie sistemy TERRA i skanera MODIS. – Rezhim dostupa: <http://modis.gsfc.nasa.gov>. (data obrashcheniya: 25.03.2018).
7. MODIS Overview [Elektronnyj resurs]: MODIS Vegetation Indices. – Rezhim dostupa: [https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis) (data obrashcheniya: 25.03.2018).
8. Nouri, H., Anderson, S., Sutton, P., Beecham, S., Naglere, P., Jarchow, C., Roberts, D. (2017) NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: An assessment of vegetation in the Adelaide Parklands. *Science of The Total Environment*. Elsevier. Vol. 584–585, 11-18.
9. Jönsson, A., Eklundh, L., Hellström, M., Barring, L., Jönsson, P. (2010). Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 114, 2719–2730.
10. Liu, L., Liang, L., Schwartz, M., Donnelly, A., Wang, Z., Schaaf, C., Liu, L. (2015). Evaluating the potential of MODIS satellite data to track temporal dynamics of autumn phenology in a temperate mixed forest. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 160, 156–165.
11. Vegetacionnye indeksy. [Elektronnyj resurs]: osnovy, formuly, prakticheskoe ispol'zovanie. – Rezhim dostupa: [http://mapexpert.com.ua/index\\_ru.php?id=20&table=news](http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=20&table=news). (data obrashcheniya: 25.03.2018). [in Russian].
12. Kozoderov, V.V., Kondranin, T.V. (2008). Metody ocenki pochvenno-rastitel'nogo pokrova po dannym opticheskikh sistem distancionnogo aerokosmicheskogo zondirovaniya *Uchebnoe posobie*, 222. [in Russian].
13. Yengoh, G., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A., Tucker, C. (2015). Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: Current Status, Future Trends, and Practical Considerations. Springer: Berlin, Germany, 109.
14. Gillespie, T., Ostermann-Kelm, S., Dong, C., Willis, K., Okin, G., MacDonald, G. (2018). Monitoring changes of NDVI in protected areas of southern California Ecological Indicators. Elsevier. Vol. 88, 485-494.
15. Petach, A.R., Toomey, M., Aubrecht, D.M., Richardson, A.D., (2014). Monitoring vegetation phenology using an infrared-enabled security camera. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol.195–196, 143–151.
16. Kovalev A., Tokareva O. (2016). Using MODIS NDVI products for vegetation state monitoring on the oil production territory in Western Siberia. MATEC Web of Conferences 4. Cep. "4th Russian Forum for Young Scientists with International Participation "Space Engineering"", 05003.
17. Peremitina, T.O., Yashchenko, I.G., Dneprovskaya, V.P. (2017). Diagnostika sostoyaniya i vosstanovlenie prirodnyh ekosistem na ob'ektah neftegazovogo kompleksa Zapadnoj Sibiri i prilgayushchih territoriyah Interekspo GEO-Sibir'-2017. Novosibirsk: Mezhdunar. nauch. konf. «Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya»: Vol. 2 (2), 186-190. [in Russian].
18. Yashchenko I.G., Peremitina T.O. (2015). Primenenie dannyh sputnikovyh nablyudenij TERRA-MODIS dlya monitoringa sostoyaniya okruzhayushchej sredy neftedobyvayushchih territorij Zapadnoj Sibiri // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Vol. 12, 42-48.
19. Ekologicheskij monitoring: Doklad o sostoyanii okruzhayushchej sredy Tomskoj oblasti v 2011 godu (2012). Departament prirodn. resursov i ohrany okruzhayushch. sredy Tom. obl., OGBU «Oblkompriroda», 166 [in Russian].

20. Ekologicheskij monitoring: Doklad o sostoyanii i ohrane okruzhayushchej sredy Tomskoj oblasti v 2012 godu (2013). Departament prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Tomskoj oblasti, OGBU «Oblkompriroda», 172. [in Russian].

21. Ekologicheskij monitoring: Doklad o sostoyanii i ohrane okruzhayushchej sredy Tomskoj oblasti v 2013 godu (2014). Departament prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Tomskoj oblasti, OGBU «Oblkompriroda», 194. [in Russian].

22. Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii i ohrane okruzhayushchej sredy Tomskoj oblasti v 2014 godu» (2015). Departament prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Tomskoj oblasti, OGBU «Oblkompriroda», 156. [in Russian].

23. Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii i ohrane okruzhayushchej sredy Tomskoj oblasti v 2015 godu» (2016). Departament prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Tomskoj oblasti, OGBU «Oblkompriroda», 156. [in Russian].

24. Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii i ohrane okruzhayushchej sredy Tomskoj oblasti v 2016 godu» (2017). Departament prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Tomskoj oblasti, OGBU «Oblkompriroda». – Izhevsk: OOO «Print-2», 2017, 160. [in Russian].

25. Postanovlenie Pravitel'stva RF N 1148 «Ob osobennostyah ischisleniya platy za negativnoe vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredu pri vybrosah v atmosferyj vozduh zagryaznyayushchih veshchestv, obrazuyushchihsya pri szhiganii na fabel'nyh ustanovkah i rasseivanii poputnogo neftyanogo gaza» [Elektronnyj resurs]: Informacionno-pravovoe obespechenie «Garant». – Rezhim dostupa: <http://ivo.garant.ru/#/document/70257422/paragraph/1073742591:4> (data obrashcheniya 23.03.2018) [in Russian].

© Т. О. Перемитина, И. Г. Яценко, 2018

## **ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ SOLANUM TUBEROSUM L. В УСЛОВИЯХ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Александра Владимировна Пелипенко*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3, аспирант, тел. (3822)49-22-23, e-mail: sasha92kra@mail.ru

*Ольга Николаевна Шплис*

Сибирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, 634050, Россия, г. Томск, Московский тракт, 2 Б, ст. преподаватель, тел. (3822)90-11-01, e-mail: olyazmeewa@yandex.ru

В настоящей работе изучено влияние природно-климатических опасностей на продуктивность разных селекционных сортов картофеля в агроклиматических условиях Томской области. Исследована динамика изменения природно-климатических условий, для произрастания пасленовых культур, в частности относительная влажность, количество осадков и температурные режимы.

Установлены природные опасности, наиболее существенно влияющие на устойчивость сортов картофеля и лимитирующие их продуктивность. Результаты работы демонстрируют, что на продуктивность сортов картофеля разной селекции наиболее существенно влияют биологические опасности, в частности жесткокрылые вредители.

**Ключевые слова:** природно-климатические факторы, биологические опасности, картофель, колорадский жук.

## **INFLUENCE OF NATURAL AND CLIMATIC HAZARDS ON THE PRODUCTIVITY OF SOLANUM TUBEROSUM L. IN THE CONDITIONS OF TOMSK REGION**

*Aleksandra V. Pelipenko*

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of RAS, 10/3, Prospect Akademichesky St., Tomsk, 634055, Russia, Ph. D., phone: (3822)49-22-23, e-mail: sasha92kra@mail.ru

*Olga N. Shplis*

Siberian State Medical University SSMU, senior lecturer, 2B, Tract Moscow St., Tomsk, 634050, Russia, phone: (3822)90-11-01, e-mail: olyazmeewa@yandex.ru

In the present work, the influence of natural and climatic hazards on the productivity of different selection varieties of potato in the agroclimatic conditions of the Tomsk Region was studied. The dynamics of changes in climatic conditions for the growth of Solanaceous cultures, in particular relative humidity, precipitation and temperature regimes, was studied.

Natural hazards, most significantly affecting the resistance of potato varieties and limiting their productivity, are established. The results of work demonstrate that the biological variability, in particular the coleopteran pests, most significantly affects the productivity of potato varieties of different breeding.

**Key words:** natural and climatic factors, biological hazards, potatoes, Colorado beetle.

## *Введение*

Одной из главных проблем сельского хозяйства Томской области является наличие большого количество природно-климатических опасностей, которые приводят к возникновению биологических рисков, к одним из наиболее опасных рисков относятся грызущие насекомые – жесткокрылые вредители (колорадский жук, 28-точечная коровка).

Известно, что первое появление колорадского жука на территории РФ, впервые зарегистрировано в 1949г. Скорость экспансии жука новых территорий варьировалась от 40 до 174 км в год [1–5]. Быстрое распространение и заселение новых территорий колорадским жуком, связано с его высокой экологической пластичностью, которая обусловлена выраженным внутривидовым адаптивным полиморфизмом генетической природы. Проблемы, связанные с вредоносностью колорадского жука для сельского хозяйства, являются актуальными не только для России, но и для всего мира [6 – 13].

В настоящее время данный вредитель находится практически во всех регионах нашей страны. Поэтому необходим научно обоснованный поиск мер по защите от этого вредителя, выведение наиболее устойчивых сортов пасленовых культур, прогнозирование по возможному «захвату» новых территорий колорадским жуком [14, 17]. Прогнозирование возможных биологических опасностей, является актуальной задачей современных исследователей.

## *Методы и материалы*

Исследования проводились на двух опытных площадках в естественных агроклиматических условиях на базе стационара Томской Сортоиспытательной Станции (ТСС) – филиала ФГУ «Государственной Комиссии Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений». Объектами изучения, были взяты сорта картофеля – Солнечный (Нарымская селекция), Невский, Тулеевский (Кемеровская селекция) – филиалов ФГБНУ СФНЦ Агробиотехнологии РАН. Семенной материал не подвергался предпосевной обработке. Агрохимические исследования свойств почв, выполнены на базе – станции агрохимической службы «Томская» (аккредитация № RA.RU.21 ПЯ58). Учет урожайности проводился весовым методом; оценку устойчивости сортообразцов картофеля к природно-климатическим условиям проводили полевыми методами, на основе биологических и морфометрических показателей; оценку устойчивости растений к вредителю проводили по заселенности и поврежденности растений; определение численности колорадского жука проводили в разные фазы растений (всходы до 15, 20 см, бутонизация – начало цветения, после цветения, образование плодов). Исходные данные, для расчета средних декадных температур воздуха, количества осадков и относительной влажности, были взяты с метеорологической станции Томска – период 2017 г. и 2005 г. [18, 19].

Результаты по урожайности сортов картофеля за период 2005 г. из источников ТСС. Исходные данные по урожайности: сорт Солнечный – 189 ц/га, сорт Невский – 143ц/га, сорт Тулеевский – 183ц/га.

Полевой опыт закладывался по методике Б. А. Доспехова (мелкоделяночные опыты) [20] в естественных агроклиматических условиях, распределение вариантов опыта – систематическое, в 4-х повторениях.

Закладка опытов проводилась на одинаковом агрофоне и при условиях единообразия технологических операций по уходу за растениями всех групп сортообразцов.

Полученные данные обработаны с помощью пакета статистических программ «Statistica for Windows 6,0». Достоверность результатов оценивали по непараметрическим критериям Mann-Whitney.

### Результаты

Первое появление жесткокрылых вредителей, в частности колорадского жука на базе стационара Томской Сортоиспытательной Станции (ТСС) зарегистрировано в 2006 г. В связи с этим при реализации исследования проводили сравнительный анализ природно-климатических условий 2005 г. и 2017 г. (рис. 1), а также продуктивность исследуемых сортов картофеля.

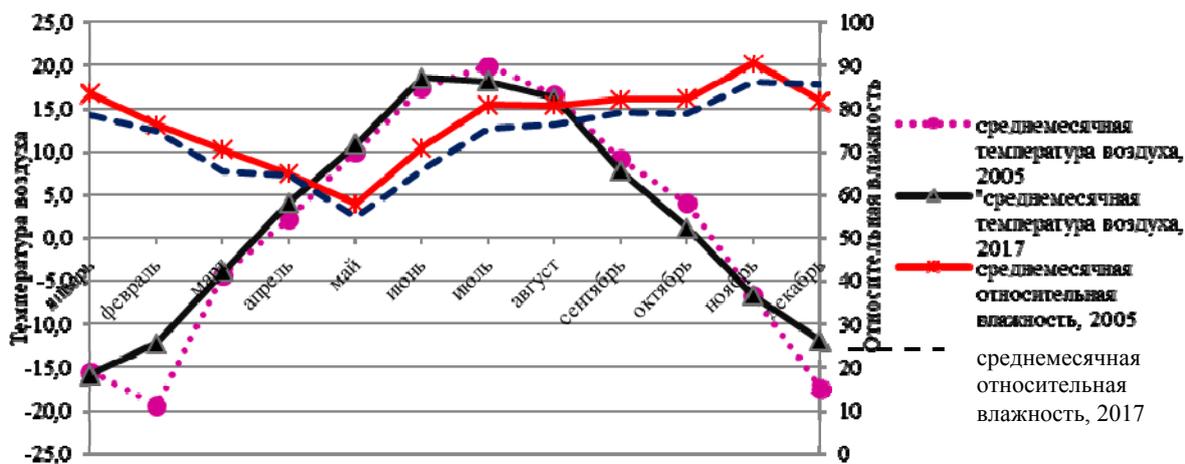


Рис. 1. Природно-климатические условия (за период 2005 г. и 2017 г.)

Из представленных данных на графике следует, что в 2017 г. температуры выше, чем в 2005 г., переход температуры через 10°C наступает в конце третьей декады мая (2017 г.), а в зимний период температуры не опускаются ниже -17°C. В 2005 г. во второй декаде мая прослеживается переход через 10°C. Относительная влажность воздуха в 2017 г. значительно ниже с января до середины октября по сравнению с 2005 г.

Анализ результатов (рис. 2) демонстрирует, что 2017 г. являлся влажным годом с резкой вариативностью осадков, минимальное количество осадков приходится на первую и вторую декаду марта и начало первой декады октября и составляет 0,3 мм и 0,5 мм соответственно. Максимальное количество осадков наблюдалось в третьей декаде июня (1,5 мм) и первой декаде августа (1,6 мм), июль отличался резким уменьшением осадков до 0,7 мм. В 2005 г. отмечается небольшое количество осадков, достигающие максимальных значений во второй половине летнего периода всего 0,5 мм.

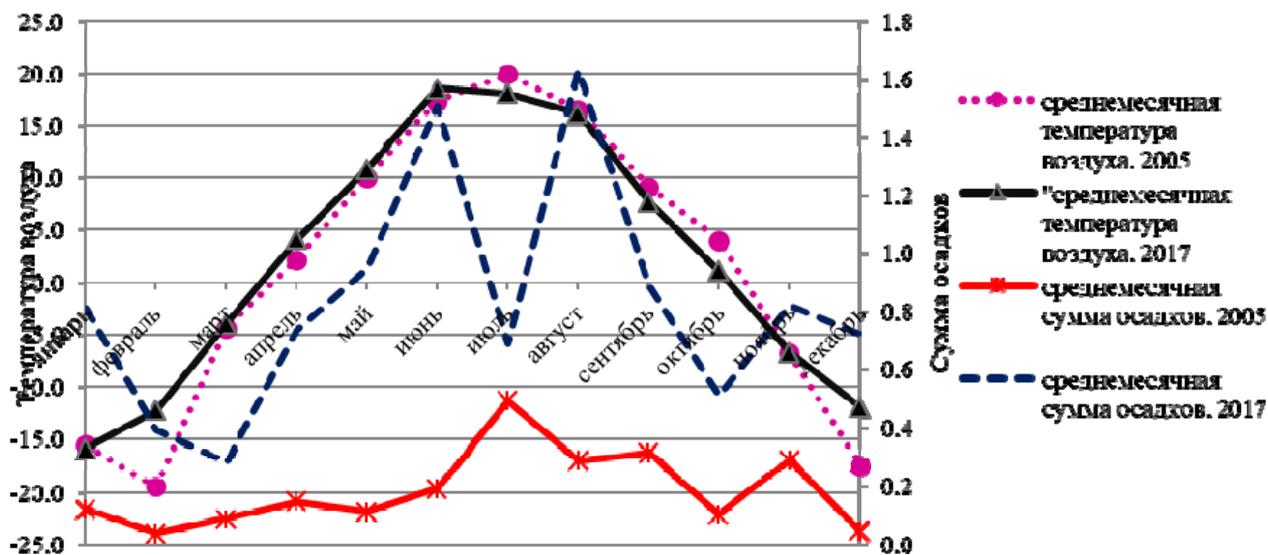


Рис. 2. Природно-климатические условия (за период 2005 г. и 2017 г.)

При анализе данных было установлено, что наибольшее количество колорадского жука наблюдалось в период фазы бутонизации на сорте Невском, численность колорадского жука достигала 1167 шт. на одном опытном образце.

Из графиков, приведенных на рис. 3, 4 прослеживается четкая тенденция влияния температуры воздуха и суммы осадков на численность колорадского жука, наибольшее среднее количество колорадского жука приходится на период с первой декады июля до первой декады августа, который совпадает с фазами бутонизации, цветения и образования семенных плодов. Температура воздуха колеблется в пределах от 19,9° С до 16,9° С, сумма осадков – 0,3 – 2,2 мм, относительная влажность – 73 % – 75 %.

Многими исследователями отмечается, что прожорливость колорадского жука наносит огромный вред будущему урожаю, а при высокой заселенности территории разновозрастными особями жука, может быть уничтожен полностью, что и наблюдалось в нашем случае. Урожайность картофеля значительно снизилась в 2017 г. (рис. 5), по отношению к 2005 г.

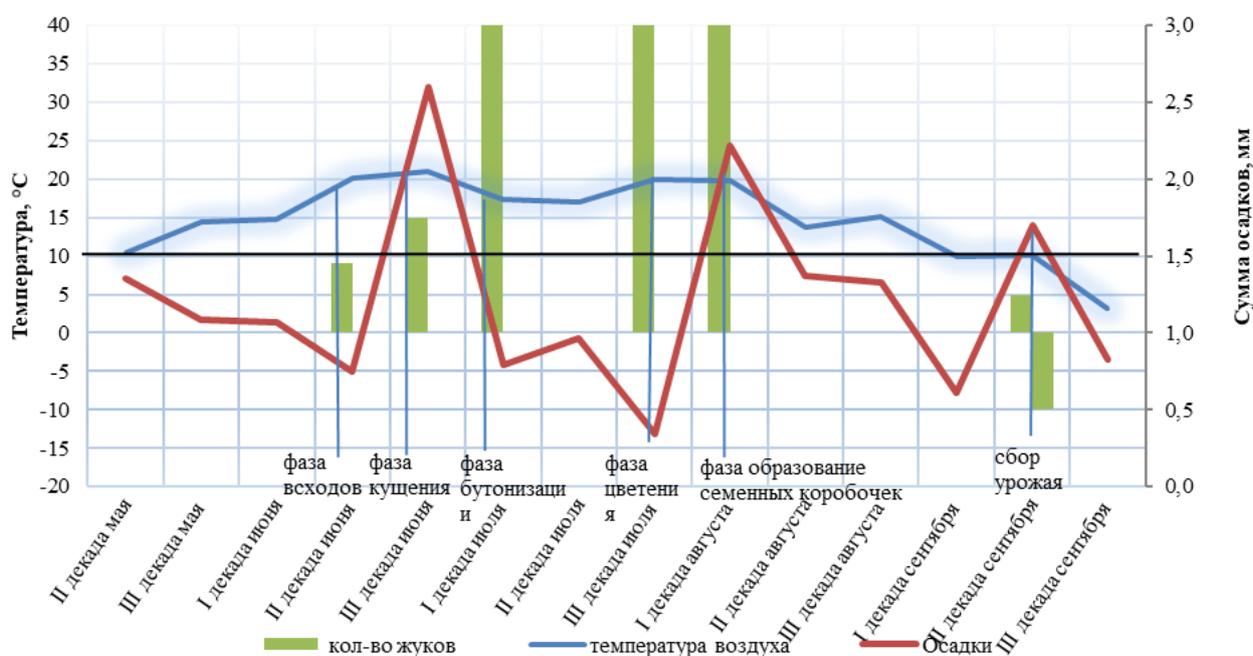


Рис. 3. Изменчивость температуры воздуха, суммы осадков и количество колорадского жука по фазам развития картофеля, 2005 г.

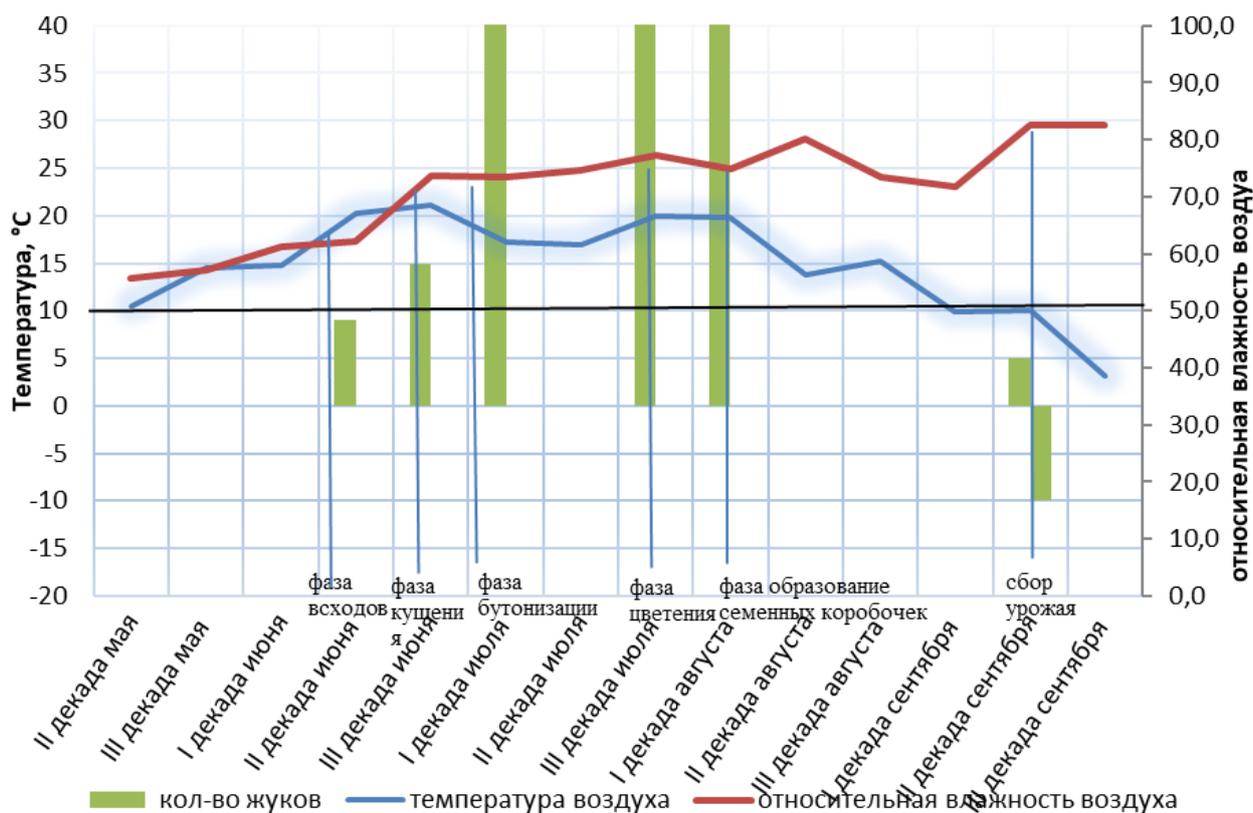


Рис. 4. Изменчивость температуры воздуха, относительная влажность и количество колорадского жука по фазам развития картофеля, 2017 г.

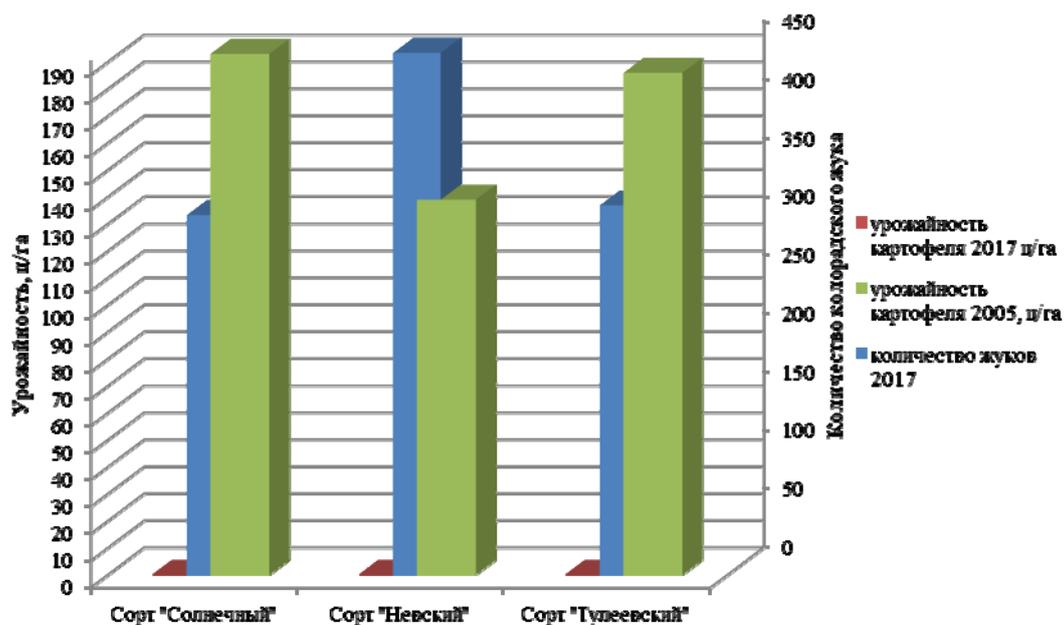


Рис. 5. Сравнительный анализ продуктивности сортов картофеля 2005, 2017 гг. на фоне заселенности сортовых образцов картофеля колорадским жуком (за весь вегетационный)

### Обсуждение

При сравнительном анализе результатов изменения природно-климатических условий 2005 г. и 2017 г., для произрастания пасленовых культур, установлено, что температурные режимы воздуха в зимний период 2005 г., значительно ниже относительно 2017 г. В период с 2005 по 2017 гг. наблюдается тенденция повышения температуры воздуха, количества осадков и относительной влажности в вегетационный период. В свою очередь, становление более благоприятных природно-климатических условий, способствовало повышению биологических опасностей, в частности интенсивному территориальному заселению жесткокрылыми грызунами.

Как известно, колорадский жук трофически связан с пасленовыми культурами, в частности с картофелем. Жуки и их личинки особенно вредоносны для картофеля в период бутонизации и цветения, что наблюдалось в нашем исследовании. Основное интенсивное заселение сортообразцов вредителем, совпало с началом фазы бутонизации картофеля и наибольшим количеством зеленой массы. Численность особей разного возраста увеличилась в разы на всех опытных образцах сортов картофеля.

Температурные режимы воздуха, сумма осадков и относительная влажность в вегетационный период 2017 г. находятся в зоне оптимума физиологического комфорта жизнедеятельности колорадского жука, в период с конца третьей декады июня до начала первой декады августа. В результате исследования

установлено, что наиболее высокий биотический потенциал насекомого пришелся на период закладки и формирования основной массы клубней, что в свою очередь отрицательно повлияло на продуктивность исследуемых образцов картофеля.

При анализе результатов выявлено, что наиболее устойчивыми сортаобразцами картофеля, к колорадскому жуку, оказались сорта Солнечный и Тулевский, наименее устойчив, оказался сорт Невский. Показатели заселенности и поврежденности растений сорта Невский вредителями (число перезимовавших жуков – имаго, более 50 шт./куст; среднее число кладок более 60 шт./куст; 100 % заселение личинками разного возраста; средний балл поврежденности листового аппарата по шкале ВИЗР 51 – 80 %; потеря ботвы свыше 25 %; 0 % доли кустов не заселенных вредителем), свидетельствует о отсутствии ризентентности к жесткокрылым вредителям.

Анализ полученных результатов доказывает, что природно-климатических условия не оказали существенного влияния на продуктивность разных селекционных сортов картофеля в агроклиматических условиях Томской области в период с 2005 по 2017 гг.

### ***Заключение***

Общий анализ результатов исследования доказывает, что на продуктивность сортов картофеля разной селекции наиболее существенно влияют природно-климатические опасности, в частности биологические.

Результаты работы демонстрируют, что повышение биологических рисков зависит от повышения биологических опасностей. По результатам исследования, прослеживается четкая корреляционная зависимость повышения биологических рисков от изменения природно-климатических условий Томской области.

### ***Благодарности***

Выражаем глубокую благодарность в помощи при реализации исследований и подготовке материалов статьи Сортоиспытательной Станции (ТСС) – филиала ФГУ «Государственной Комиссии Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений» в лице директора Куприянова Сергея Семеновича.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Наумова Н.И. Влияние условий зимовки на расселение колорадского жука при его территориальной экспансии в Северо-Западном регионе России // Вестник защиты растений. – 2015. – № 1(83). – С. 45–48.
2. Гриценко В.В., Стройкова Ю.М., Третьяков Н.Н. Вредители и болезни сельскохозяйственных культур/ под ред. Ю.М. Стройкова. – М: Издательский центр "Академия". – 2008. – 224 с.

3. Малюга А.А., Чуликова Н.С. Колорадский жук и оптимизация фитосанитарного состояния посадок картофеля. Издательство: СФНУЦ агробιοтехнологий РАН (Краснообск). – 2017. – 99 с.
4. Мацишина Н.В. Развития колорадского жука в зависимости от температуры и фотопериода // Защита и карантин растений. М.: Редакция журнала «Защита и карантин растений». – 2014. – №11. – С. 49–50
5. Both E., Alyokhina A. Colorado potato beetle response to potato plants infected with potato virus Y and potato leafroll virus // American journal of potato research. – 2016. – Т. 93. – № 3. – Pp. 213–223.
6. Сили И.И. Теоретический анализ процесса взаимодействия радиоимпульсов с колорадскими жуками в растительной среде картофеля // Технологический аудит и резервы производства. Харьков: Технологический центр. – 2015. – Т.4. – № 2 (24). – С. 550–559.
7. Alyokhin A. Colorado potato beetle management on potatoes: current challenges and future prospects // Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology. – 2009. – № 3(1). Pp. 10–19.
8. Красников С.Н., Красникова А.С, Братчик О.В., Крючкова Т.В., Ажермачева М.В. Колорадский жук в Томской области / Экология Южной Сибири и сопредельных территорий. В 2 т / отв. ред. В.В. Анюшин. – Абакан: ГОУ ВПО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова». – 2010. – Вып. 14. Т. 1 – С. 73
9. Baker M., Hossain K., Zabierek K., Collie K., Alyokhin A., Mota-Sanchez D., Whalon M. Geographic variation in cannibalism in Colorado potato beetle (Coleoptera: chrysomelidae) populations // Environmental entomology. – 2014. – Т 43. №1. – Pp. 102–109
10. Красников С.Н., Красникова А.С, Братчик О.В., Крючкова Т.В. Колорадский жук в северных условиях Сибири // Евразийское научное объединение. Изд-во: Орлов Максим Юрьевич. – 2017. – Т.2. – №3 (25). – С. 177–179.
11. Чуликова Н.С., Малюга А.А., Цветкова В.П. Фенология колорадского жука в условиях Новосибирской области // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. Новосибирск. – 2012. – Т.2. – №23. – С. 33–37.
12. Рябова Н.В. Устойчивость сортов картофеля к повреждению колорадским жуком и особенности его развития в условиях Кемеровской области // Вестник Красноярского Государственного аграрного университета. – 2011. – №2. – С. 194–197.
13. Деменко В.М., Кугук Г.А. Колорадский жук и мер борьбы с ним в условиях Черниговской области // Вестник Сумского национального аграрного университета. Изд-во: Сумы. – 2014. – № 9 (28). – С. 19–22
14. Новохацкая Л.Л., Калинин В.М., Фасулати С.Р., Фролов А.Н. Оценка заселенности и повреждаемости картофеля колорадским жуком в условиях сортоиспытания // Актуальные вопросы энтомологии. Труды Ставропольского отделения Русского энтомологического общества. Материалы Международной научно-практической конференции. Ставрополь: Издательство "АГРУС" (Ставрополь). – 2008. – С. 305–308
15. Чуликова Н.С., Малюга А.А., Цветкова В.П. Влияние температуры и влажности окружающей среды на весенний выход колорадский колорадского жука из почвы в условиях Новосибирской области // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. Новосибирск: НГАУ. – 2012. – Т.4. – №25. – С. 35–39
16. Евтушенко Т.Н., Малюга А.А., Чуликова Н.С. Привлекательность сортов картофеля для колорадского жука и использование ловчих посадок для защиты культур от вредителя в условиях лесостепи Приобья // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. Новосибирск: НГАУ. – 2016. – №1 (38). – С. 7–15
17. Мигранов М.Г., Сыртланова Л.А. Колорадский жук *Leptinotarsa decemlineata* say на южном Урале: морфометрический анализ полиморфизма // Совершенствование методологии познания в целях развития науки. международной научно-практической конференции: сб. статей в 3 частях. Изд-во: ООО «Аэтерна» (Уфа). – 2017. – С. 31–34.

18. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России». Томск 2005.

19. <https://rp5.ru>.

20. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

## REFERENCES

1. Naumova N.I. Influence of wintering conditions on the settlement of the Colorado potato beetle during its territorial expansion in the North–West region of Russia // *Vestnik p.* – 2015. – No. 1 (83). – P. 45–48 [in Russian].

2. Gritsenko VV, Stroikova Yu.M., Tretyakov N.N. Pests and diseases of agricultural crops / ed. Yu.M. Stroikov. – M: The publishing center "Academy". – 2008. – 224 p [in Russian].

3. Malyuga AA, Chulikova NS Colorado beetle and optimization of phytosanitary state of planting potatoes. Publisher: SFNUTS agrobiotekhnologii RAN (Krasnoobsk). – 2017. – 99 p [in Russian].

4. Matsishina N.V. Development of Colorado beetle depending on temperature and photoperiod // *Protection and quarantine of plants.* M.: Editorial Board of the journal "Plant Protection and Quarantine". – 2014. – № 11. – P. 49–50

5. Both E., Alyokhina A. Colorado potato beetle response to potato plants infected with potato virus Y and potato leafroll virus // *American journal of potato research.* – 2016. – T.93. – №3. – Pp. 213–223.

6. Sili II Theoretical analysis of the process of interaction of radio impulses with Colorado beetles in plant potato medium // *Technological audit and production reserves.* Kharkov: Technological center. – 2015. – T.4. – No. 2 (24). – C. 550–559 [in Russian].

7. Alyokhin A. Colorado potato beetle management on potatoes: current challenges and future prospects // *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology.* – 2009. – No. 3 (1). Pp. 10–19.

8. Krasnikov SN, Krasnikova AS, Bratchik OV, Kryuchkova TV, Azhernacheva MV Colorado beetle in the Tomsk region / *Ecology of Southern Siberia and adjacent territories.* In 2 tons / ot. Ed. V.V. Anyushin. – Abakan: GOU VPO "Khakas State University. N.F. Katanova. " – 2010. – Issue. 14. T. 1 – P. 73 [in Russian].

9. Baker M., Hossain K., Zabierek K., Collie K., Alyokhin A., Mota–Sanchez D., Whalon M. Geographic variation in cannibalism in Colorado potato beetle (Coleoptera: chrysomelidae) populations // *Environmental entomology.* – 2014. – T 43. №1. – PP. 102–109

10. Krasnikov SN, Krasnikova AS, Bratchik OV, Kryuchkova T.V. Colorado beetle in the northern conditions of Siberia // *Eurasian scientific association.* Publishing house: Orlov Maxim Yurievich. – 2017. – T.2. – №3 (25). – P. 177–179 [in Russian].

11. Chulikova NS, Malyuga AA, Tsvetkova VP Phenology of the Colorado beetle in the conditions of the Novosibirsk Region // *Bulletin of the Novosibirsk State Agrarian University.* Novosibirsk. – 2012. – T.2. – №23. – P. 33–37 [in Russian].

12. Ryabova N.V. Stability of potato varieties to damage by the Colorado beetle and features of its development in the conditions of the Kemerovo region // *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University.* – 2011. – №2. – P. 194–197 [in Russian].

13. Demenko VM, Kuguk G.A. Colorado beetle and measures to combat it in the Chernigov region // *Bulletin of the Sumy National Agrarian University.* Publishing house: Sumy. – 2014. – No. 9 (28). – P. 19–22 [in Russian].

14. Novokhatskaya LL, Kalinkin VM, Fasulati SR, Frolov AN Assessment of the seediness and damageability of potatoes by the Colorado beetle in the conditions of strain testing // *Actual questions of urgent issues of entomology. Proceedings of the Stavropol Branch of the Russian Entomological Society. Materials of the International Scientific and Practical Conference.* Stavropol: Publishing house "AGRUS" (Stavropol). – 2008. – P. 305–308 [in Russian].

15. Chulikova NS, Malyuga AA, Tsvetkova VP Influence of temperature and humidity of the environment on the spring yield of the Colorado potato beetle from the soil in the conditions of the Novosibirsk Region // Bulletin of the Novosibirsk State Agrarian University. Novosibirsk: NSAU. – 2012. – T.4. – № 25. – P. 35–39 [in Russian].

16. Evtushenko TN, Malyuga AA, Chulikova NS The attractiveness of potato varieties for the Colorado beetle and the use of hitching landings to protect crops from pests in the forest–steppe of the Ob region // Bulletin of the Novosibirsk State Agrarian University. Novosibirsk: NSAU. – 2016. – No. 1 (38). – P. 7–15 [in Russian].

17. Migranov MG, Syrtlanova LA Colorado beetle *Leptinotarsa decemlineata* say in the southern Urals: morphometric analysis of polymorphism // Perfection of the methodology of cognition for the development of science. international scientific–practical conference: Sat. articles in 3 parts. Publishing house: LLC "Aeterna" (Ufa). – 2017. – P. 31–34 [in Russian]

18. Bulygina O.N., Veselov VM, Razuvaev VN, Aleksandrova T.M. "Description of the array of urgent data on the main meteorological parameters at Russian stations". Tomsk 2005 [in Russian].

19. <https://rp5.ru>.

20. Armorov B.A. Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results). – 5 th ed., Ext. and pererab. – M.: Agropromizdat, 1985. – 351 p. [in Russian]

© А. В. Пелипенко, О. Н. Шлис, 2018

## **ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

*Надежда Алексеевна Никитина*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, обучающийся, e-mail: nadezhda\_n4913@mail.ru

В статье представлен обзор современных методов исследования лесного покрова по данным дистанционного зондирования. Рассмотрены характеристики ресурсов, предоставляющих данные в открытом доступе, а также технологий определения количества древесных насаждений на основе воздушно-лазерного сканирования и данных дистанционного зондирования Земли.

**Ключевые слова:** космические снимки, данные дистанционного зондирования, исследование лесного покрова.

## **REVIEW OF MODERN RESEARCH METHODS OF FOREST COVER BY REMOTE SENSING**

*Nadezhda A. Nikitina*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Student, e-mail: nadezhda\_n4913@mail.ru

The article presents a review of modern research methods of forest cover based on remote sensing data. The resources that provide open data, as well as tree plantation inventory technology based on laser scanning data and RSD are considered.

**Key words:** satellite images, RSD, forest cover.

Дистанционное зондирование Земли используется для мониторинга окружающей среды с конца XX века. Спутники, созданные для целей ДЗЗ, совершенствуются до сих пор. С помощью космических снимков можно оперативно получать достоверную информацию о различных средах, в том числе о лесной растительности. Это очень важно, так как леса занимают значительную площадь на территории России, поэтому своевременное выявление нарушения лесного покрова имеет большое значение. Получение актуальных данных о гибели лесных массивов позволяет существенно снизить экономический и экологический ущерб, нанесённый лесному фонду.

Использование космических снимков для изучения растительного покрова может помочь в решении ряда задач:

- инвентаризация растительного покрова;
- количественная оценка на основе спектральных индексов;
- моделирование и прогнозирование распределения отдельных элементов растительного покрова;
- оценка и картографирование параметров окружающей среды;

- оценка пространственного распределения характеристик растительного покрова;
- мониторинг и оценка изменений характеристик растительного покрова;
- совместный ГИС-анализ данных дистанционного зондирования и других данных [4].

Доступность данных дистанционного зондирования позволяет оперативно получать информацию, развивать методы ее обработки, создавать информационные сети, без ограничения по территориальной или ведомственной принадлежности.

При решении вопросов мониторинга наземных экосистем, в частности лесов, используются снимки низкого и среднего разрешения.

На сегодняшний день в открытом доступе предоставляются данные Terra-MODIS, Aqua-MODIS, Landsat-TM/ETM+, Sentinel-2, которые отвечают следующим требованиям:

- наличие устойчивых технических условий,
- регулярное обновление архивов спутниковых данных,
- высокое качество данных,
- наличие многолетних рядов данных охватывающих всю поверхность Земли.

Оперативность обработки данных зависит не только от их доступности, но и от частоты их обновления, то есть от частоты съёмки. Данные MODIS – 2 раза в сутки, Landsat – 16 дней, Sentinel – 5 дней.

Снимки MODIS с пространственным разрешением 250 м и 500 м используются для изучения биологических и физических процессов, а также для исследования растительного покрова. Полоса охвата составляет 2330 км, а данные измерений покрывают всю территорию России. Архив снимков MODIS содержит материалы наблюдений, выполнявшихся ежедневно на протяжении 15 лет. Анализ этой информации можно использовать для изучения и мониторинга растительного покрова. В частности, данные MODIS, используются для распознавания различных групп пород леса, определения параметров лесного покрова, оценки возрастной структуры лесных насаждений [1].

Также в свободном доступе находятся снимки Landsat в исходном виде. Исследование этих снимков является источником информации для проведения лесоустройства и лесной инвентаризации. Большое количество исследований подтверждает возможность дешифрирования среднего возраста, высоты и сомкнутости полога лесных насаждений. Также снимки Landsat применяются для оценки продуктивности растительного покрова, для мониторинга за состоянием процессов лесовозобновления и лесовосстановления, для выявления нарушений в лесном покрове [5].

Например, по данным космосъёмки Landsat были проанализированы изменения, произошедшие за 20 лет в лесном покрове на территории Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника [2].

Следует обратить внимание на то, что 4 декабря 2015 года для пользователей стали открыты данные спутника Sentinel-2. Камеры спутника охватывают полосу шириной 290 км, что на 65 км больше, чем у Landsat, а цветные изображения имеют лучшее разрешение.

Снимки Sentinel-2 расширили возможности мониторинга растительного покрова. Дешифрирование снимков среднего разрешения делает возможным получение достоверной информации о структуре и площади выбранных категорий земель. На примере Шебекинского муниципального района Белгородской области специалистами западного филиала государственной инвентаризации лесов – филиал «Рослесинфорг» методом автоматизированного дешифрирования снимков среднего разрешения Sentinel-2 определена лесистость и количественные характеристики лесов [6].

Для определения характеристик лесных ландшафтов и рационального использования лесных ресурсов большой потенциал имеют технологии воздушного лазерного сканирования. Они позволяют определять степень деградации лесов и изменения в землепользовании. Технология воздушного лазерного сканирования наиболее эффективна на больших площадях, а также обладает высокой точностью и быстротой сбора данных для инвентаризации лесов [7].

Ещё одной интересной технологией является обработка космических снимков с помощью нейронных сетей. Исследование проводилось на территории тестового участка в районе с. Половодово. Его целью была разработка технологии таксации лесов на основе объединения данных воздушного лазерного сканирования и данных дистанционного зондирования Земли. Полученные в ходе работы растры могут быть использованы в различных сферах лесного хозяйства [3].

Обработка данных дистанционного зондирования Земли – это мощный инструмент, позволяющий упрощать работу и получать информацию, которую практически невозможно собрать другими способами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. – М.: ИКИ РАН, 2016. – С. 208.
2. Бунтова О.Ю., Мухарамова С.С. Детектирование изменений лесного покрова по данным дистанционного зондирования земли. // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2016. – Т. 25, № 4. – С. 130-135.
3. Кедров А.В., Тарасов А.В. Классификация лесной растительности методом нейронных сетей // ВЕСТНИК ПНИПУ – 2017. – № 22 – С. 44-54.
4. Комарова А. Ф., Журавлева И. В., Яблоков В. М. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова // Принципы экологии. – 2016. – № 1. – С. 40–74.
5. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Губаев А. В. Лежнин С. А., Полевщикова Ю. А., Демишева Е. Н. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat // Вестник

Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 1(21). – С. 18-32.

6. Перепечина Ю. И. Определение лесистости и количественных характеристик лесов по космическим снимкам Sentinel-2 (на примере Шебекинского муниципального района Белгородской обл.) [Электронный ресурс] / Ю. И. Перепечина, О. И. Глушенко, Р. С. Корсиков // Лесхоз. информ. : электрон. сетевой журн. – 2017. – № 4. – С. 85–93. URL: <http://hi.vniilm.ru/>

7. Технология воздушного лазерного сканирования (LIDAR) для целей таксации леса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecogeoproject.com/o-kompanii/publikatsii/lazernoe-skanirovanie/44-lesnaya-otrasl>.

© Н. А. Никитина, 2018

## **РАСТИТЕЛЬНАЯ ИНДИКАЦИЯ УРОВНЯ ПОДТОПЛЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ ЛЕСОБОЛОТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

### ***Елена Владимировна Михайлова***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат географических наук, ст. преподаватель кафедры экологии и природопользования, тел. (923)246-06-59, e-mail: milek123@mail.ru

### ***Нина Петровна Миронычева-Токарева***

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, кандидат биологических наук, зав. лабораторией биогеоценологии, тел. (383)363-90-18, e-mail: nina@issa.nsc.ru

### ***Екатерина Александровна Сайб***

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, техник-лаборант лаборатории биогеоценологии, тел. (383)363-90-18, e-mail: sajb.katerina@yandex.ru

### ***Богдан Владиславович Миляев***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, обучающийся, тел. (383)361-08-86, e-mail: bomil13@mail.ru

В настоящее время одной из важнейших задач геоэкологии является анализ влияния хозяйственной деятельности на окружающую среду на региональном и локальном уровнях. К числу недостаточно изученных вопросов относятся негативные последствия, вызываемые строительством линейных сооружений через заболоченные леса и болота. Оценка трансформации лесо-болотных комплексов возможна на основе растительной индикации, заключающейся в определении уровня подтопления по изменению отдельных компонентов растительного покрова (фитоиндикаторов), что очень важно при проведении мониторинговых наблюдений за состоянием природной среды.

В данной статье приводятся результаты исследования процессов трансформации растительности при нарушении стока вод, вызванных прокладкой дорожного полотна через болотные комплексы. Степень трансформации компонентов болотной геосистемы определялась методом сравнения фоновой растительности с растительностью одноранговых геосистем находящихся под воздействием подтопления.

Для определения индикационной значимости того или иного вида авторами была проанализирована встречаемость доминантных видов трав и мхов в растительных сообществах на экспериментальных площадках. В качестве фитоиндикаторов выделялись виды, встречающиеся только на нарушенном участке либо те, которые значительно увеличивали свое проективное покрытие при подтоплении в пространстве и во времени. Установлено, что основными индикационными видами являются гидрофитные виды сфагновых мхов, осок и пушиц. Во времени наблюдается уменьшение площади водного зеркала, за счет увеличения проективного покрытия мохово-кустарничкового яруса и восстановления видового состава на участке подтопления.

Полученные данные по выделенным фитоиндикаторам позволяют сделать вывод о том, что растительная индикация подтоплений в районах с большим количеством болот и заболоченных лесов возможна и перспективна.

**Ключевые слова:** экосистема, видовой состав, проективное покрытие, растительные индикаторы, подтопление, таежная зона.

## PLANT INDICATION OF THE LEVEL OF TIME FLOODING OF FOREST-BOGS COMPLEXES OF THE TAIGA OF WESTERN SIBERIA

### *Elena V. Mikhailova*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior Lecturer, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (923)246-06-59, e-mail: milek123@mail.ru

### *Nina P. Mironycheva-Tokareva*

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Head of Laboratory of Biogeocenotic, phone: (383)363-90-18, e-mail: nina@issa.nsc.ru

### *Ekaterina A. Sayb*

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Technician of Biogeocenology Laboratory, phone: (383)363-90-18, e-mail: sajb.katerina@yandex.ru

### *Bogdan V. Milyaev*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Student, phone: (383)361-08-86, e-mail: bomil13@mail.ru

One of the most important tasks of modern ecology is the analysis of the influence of anthropogenic activity to the regional and local environment state. At present, one of the most important tasks of geocology is the analysis of the impact of technogenic activity on the regional and local environment. The insufficiently studied issues include the negative consequences caused by the construction of line structures through swamped forests and swamps. An assessment of the transformation of swamp forest complexes is possible on the basis of a plant indication, which consists in determining the level of underflooding by changing individual components of the vegetation cover (phytoindicators), which is very important for monitoring observations of the state of the natural environment.

The article contains the results of research of processes of transformation of vegetation due to water runoff disturbance caused by a lining of a road surface through swamp complexes. The degree of transformation of the components of the swamp geosystem was determined by comparing the background vegetation with the vegetation of peer-to-peer geosystems under the influence of flooding.

To determine the indicator significance of a species, the occurrence of dominant species of grasses and mosses in plant communities on experimental sites was analyzed., species that were found only in the disturbed area or those that significantly increased their projective coverage when flooded in space and in time were identified as phytoindicators. The hydrophytic species of sphagnum mosses, sedges and cotton grasses were the main indicator species. A decrease of the area of the water mirror due to the increase of the moss-shrub layer in the projective coverage and the restoration of species composition with the passage of time was identified.

The data obtained on the selected phytoindicators allow to conclude that vegetative indications of flooding in areas with a large number of swamp and swamp forests are possible and promising.

**Key words:** ecosystem, species composition, cover, indicators, flooding, taiga zone.

## *Введение*

В настоящее время одной из важнейших задач геоэкологии является анализ влияния хозяйственной деятельности на окружающую среду на региональном и локальном уровнях. К числу недостаточно изученных вопросов относятся негативные последствия, вызываемые строительством линейных сооружений. Эффективное изучение и оценка трансформации лесо-болотных комплексов возможны на основе растительной индикации, заключающейся в определении уровня подтопления по изменению отдельных компонентов растительного покрова (фитоиндикаторов) в пространстве и во времени, что очень важно для проведения мониторинговых наблюдений за состоянием природной среды.

Растительность является важнейшим компонентом биогеоценоза, обеспечивающим жизнедеятельность других биотических компонентов. Изменения растительности под действием различных факторов внешней среды влияют на состояние геосистемы в целом и, вследствие этого, могут использоваться в качестве диагностических признаков изменения среды. Большая часть исследований явления подтопления посвящена вопросам трансформации геосистем, таких как трансформация почвенного профиля, изменение видового состава, продуктивности фитоценозов, химического состава вод (Сулейманов, Кульков, Чигир, 2001; Садов, 2003; Сорокина, 2003; Казанцева, 2008; Гидрология заболоченных территорий многолетней мерзлоты Западной Сибири, 2009, Шишконокова с соавт.; 2016, Канцорова, 2012, Беспалова, 2010, Васильев, 1998, Соромотин, 2005). Публикации зарубежных авторов отсутствуют, так как наибольшее количество болот и заболоченных лесов отмечено для территории Западной Сибири.

В связи с недостаточной изученностью временных характеристик подтоплений вдоль линейных сооружений наша работа направлена на уточнение информации о трансформации растительности и выявление индикаторов в выбранных однотипных болотных экосистемах, различных мерзлотных зон и на различных временных стадиях развития подтопления.

## *Материалы и методы*

Степень трансформации компонентов природного ландшафта была определена методом сравнения фоновой растительности с растительностью одноранговых геосистем находящихся под воздействием подтопления (Миляева, 2013, Миронычева-Токарева, Михайлова, Вишнякова, 2017).

Контрольные участки выбирались визуально на сходных элементах рельефа, со схожим растительным покровом (Михайлова с соавт., 2017).

Материалом для анализа биоразнообразия служили геоботанические описания на площадках размером 100 м<sup>2</sup>, на которых учитывалось обилие каждого вида в баллах и процентах (1 балл – покрытие 0,1–10 %; 2 балла – покрытие 10–20 %; 3 балла – покрытие 20–30 %; 4 балла – 30–40 %; 5 баллов – 40–50 %, 6 баллов – 50–60 %, 7 баллов – 60–70 %, 8 баллов – 70–80 %, 9 баллов –

80–90 %, 10 баллов – 90–100 %) в каждом из ярусов. Для каждой пробной площадки указывался видовой состав сосудистых растений, тип сообщества по доминантам (таблица).

### Процент проективного покрытия в баллах

Балл	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% проективного покрытия	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80	80–90	90–100

### Результаты и обсуждение

Различия между пространственной организацией нарушенных и нативных болотных геосистем определялись его проективным покрытием и изменением состава растительного покрова по древесному ярусу, ярусу кустарничков, трав и мхов в пространстве таежной зоны (рис. 1).

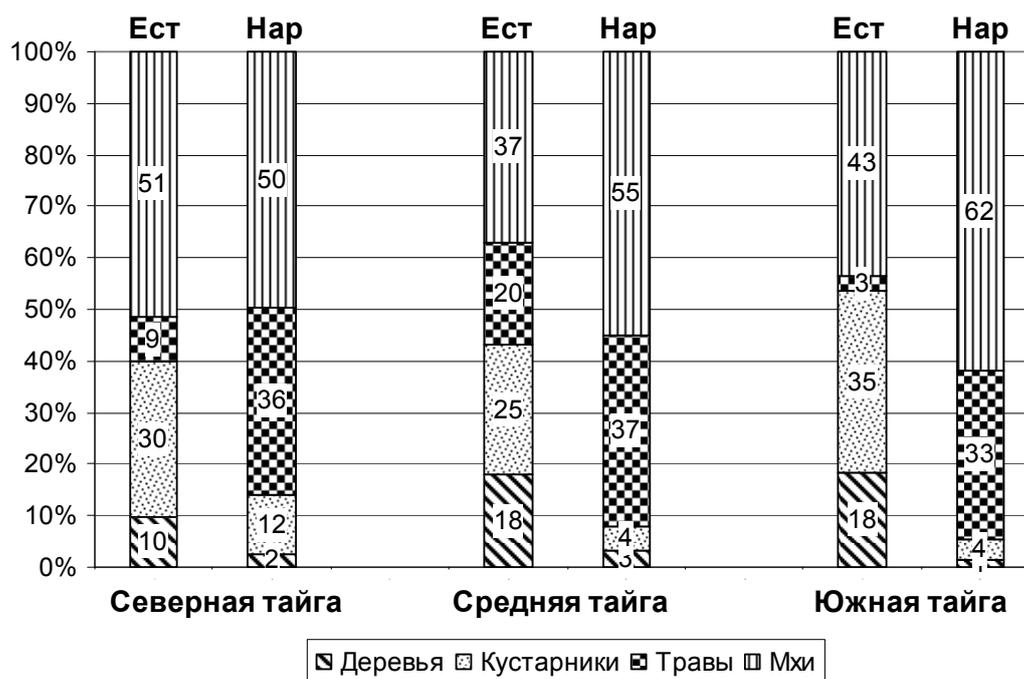


Рис. 1. Структура проективного покрытия исследуемых участков (Ест – естественные геосистемы; Нар – нарушенные геосистемы)

В северной тайге проективное покрытие древесных видов в среднем по каждому виду уменьшается в 2 раза с 60 до 27 %. Наиболее подвержена нагрузке ель, растения этого вида полностью выпадают. Наиболее устойчива к нагрузке береза повислая, ее проективное покрытие уменьшается на 25 %.

Кустарники в северной тайге в меньшей степени подвержены нагрузке. В среднем проективное покрытие в этой группе уменьшается на 10 %. В этой экологической группе встречаются виды как с отрицательной динамикой, так и с положительной. В большей степени отрицательной нагрузке подвержены черника и брусника – черника полностью выпадает, а брусника уменьшает свое присутствие на 60 %. В свою очередь кассандра, клюква мелкоплодная и карликовая березка при подтоплении увеличивают свое проективное покрытие до 34 %.

Видовой состав травянистых растений в северной тайге имеет значительно большее видовое разнообразие, чем в группах кустарников и деревьев. Большинство травянистых видов на нарушенных землях увеличивают свое проективное покрытие. К 9 существующим в ненарушенном сообществе видам трав добавляются 11 новых видов. Из присутствующих видов в два раза увеличивают свое проективное покрытие осока сероватая и морошка, а осока шаровидная (на 33 %) и хвощ болотный (на 48 %) уменьшают свое проективное покрытие. Из внедрившихся видов наибольшее проективное покрытие отмечается для пушицы многоколосковой – 67 %.

Группа мхов представлена наибольшим видовым разнообразием. В ненарушенной экосистеме мхи представлены 19 видами, в нарушенной – 15 видами. Причем 9 видов, представленных в контрольной геосистеме, полностью выпадают в нарушенной, в свою очередь разнообразие мхов в нарушенной экосистеме пополняется пятью новыми видами, которые отсутствовали в контрольной экосистеме северной тайги (рис. 1).

Деревья на исследуемых участках средней тайги представлены четырьмя видами. Отношение их к антропогенному воздействию неоднозначно. Кедр и ель полностью выпадают в нарушенных геосистемах, тогда как в естественных их проективное покрытие достигало 66 %. Сосна обыкновенная, а береза повислая на нарушенных участках увеличивают свое проективное покрытие на 52 %.

Также чувствительны к условиям произрастания в средней тайге виды кустарников. Андромеда, черника, клюква мелкоплодная полностью исчезают на нарушенных территориях, остальные виды уменьшают свое проективное покрытие на 34–67 %. На нарушенных территориях появляется ива, которая на контрольных участках не встречается (рис. 1).

Видовое разнообразие травянистых растений на нарушенных участках возрастает. Здесь зарегистрировано 20 видов, тогда как на контрольных площадках отмечается всего шесть видов. Из видов, произрастающих на ненарушенных территориях, только морошка не встречается на подтоплениях, остальные либо увеличивают свое проективное покрытие либо оно остается неизменным (рис. 1).

В группе мхов также происходит перераспределение видов в нарушенных и контрольных геосистемах. Одни виды исчезают, другие появляются. Видовое разнообразие на контрольных участках представляют 8 видов зеленых и сфаг-

новых мхов, на нарушенных – 21 вид. Виды, присутствующие в обеих экосистемах, как правило, сохраняют свое проективное покрытие (рис. 1).

Древесные виды в южной тайге представлены двумя видами: сосна обыкновенная и сибирская. Оба вида уменьшают свое проективное покрытие на нарушенных территориях, первый на 33 %, второй на 67 % (рис. 1).

Из 6 видов кустарничков, представленных в геосистемах южной тайги, пять не подвержены изменениям на нарушенных территориях. И лишь клюква мелкоплодная увеличивает свое покрытие на нарушенных территориях на 34 %.

Группы травянистых растений и группа мхов представлена значительно меньшим количеством видов, чем в северной и средней тайге. В обеих группах происходит практически полное перераспределение видов между нарушенными и естественными геосистемами, те виды, которые присутствуют на контроле, полностью отсутствуют на нарушенных территориях и наоборот. Лишь пушица влагалищная в группе травянистых растений и кукушкин лен в группе мхов, присутствуют в обеих экосистемах. Оба вида уменьшают свое проективное покрытие на 1/3 (рис. 1).

Фитоиндикаторами называются виды, фитоценозы, или экологические ряды сообществ, которые используются как показатели определенных экологических условий. Вслед за С.В. Викторовым (1962) авторы выделяли в качестве растительных индикаторов те виды растений, которые тесно связаны с определенными экологическими условиями и которые могут качественно или количественно оцениваться по присутствию этих растений.

Для определения индикационной значимости того или иного вида была проанализирована встречаемость доминантных видов трав и мхов в растительных сообществах на экспериментальных площадках. В качестве фитоиндикаторов выделялись виды, встречающиеся только на нарушенном участке либо те, которые значительно увеличивали свое проективное покрытие при подтоплении в пространстве и во времени. В основном это были виды травяного яруса.

Во всех подзонах тайги индикаторами 2–5-летних подтоплений являются осоки пузырчатая, сероватая и топяная, пушицы многоколосковая и рыжеватая. Для подтоплений 10–20-лет выявлены в качестве индикаторов те же виды осок и пушиц, что и для подтоплений 2–5 лет. Для подтоплений северной тайги возрастом около 40 лет являются индикаторами осоки: пузырчатая, сероватая, плетевидная и топяная, пушицы: многоколосковая и рыжеватая. Из мхов отмечен сфагнум большой (рис. 2).

В сорокалетних подтоплениях средней тайги к осокам сероватой и пузырчатой добавляются белокрыльник болотный, пушицы многоколосковая и рыжеватая. Для старых подтоплений южной тайги характерен тот же видовой состав трав – индикаторов, как и для средней тайги (Миляева, 2013).

В моховом ярусе на молодых подтоплениях северной тайги 5 и 10 лет выделен сфагнум центральный как растительный индикатор нарушения гидрологического режима стока болотных вод. Для средней тайги сфагнум береговой, который часто занимает до 30–50 % проективного покрытия. Сфагнум большой является индикатором подтоплений в северной и средней тайге. Единого инди-

катора для всей таежной зоны не было выделено, так как сфагновые мхи имеют очень большое видовое разнообразие, чувствительны к смене климата и экологическим условиям. Печеночный мох – маршанция полиморфная и варнсторфия плавающая из семейства калиергоновых являются индикторами старых подтоплений средней тайги: В южной тайге на старовозрастных потоплениях в моховом ярусе возрастает проективное покрытие мочажинных сфагновых мхов и зеленых мхов из рода калиергоновых, выделяемых авторами в качестве индикаторов.

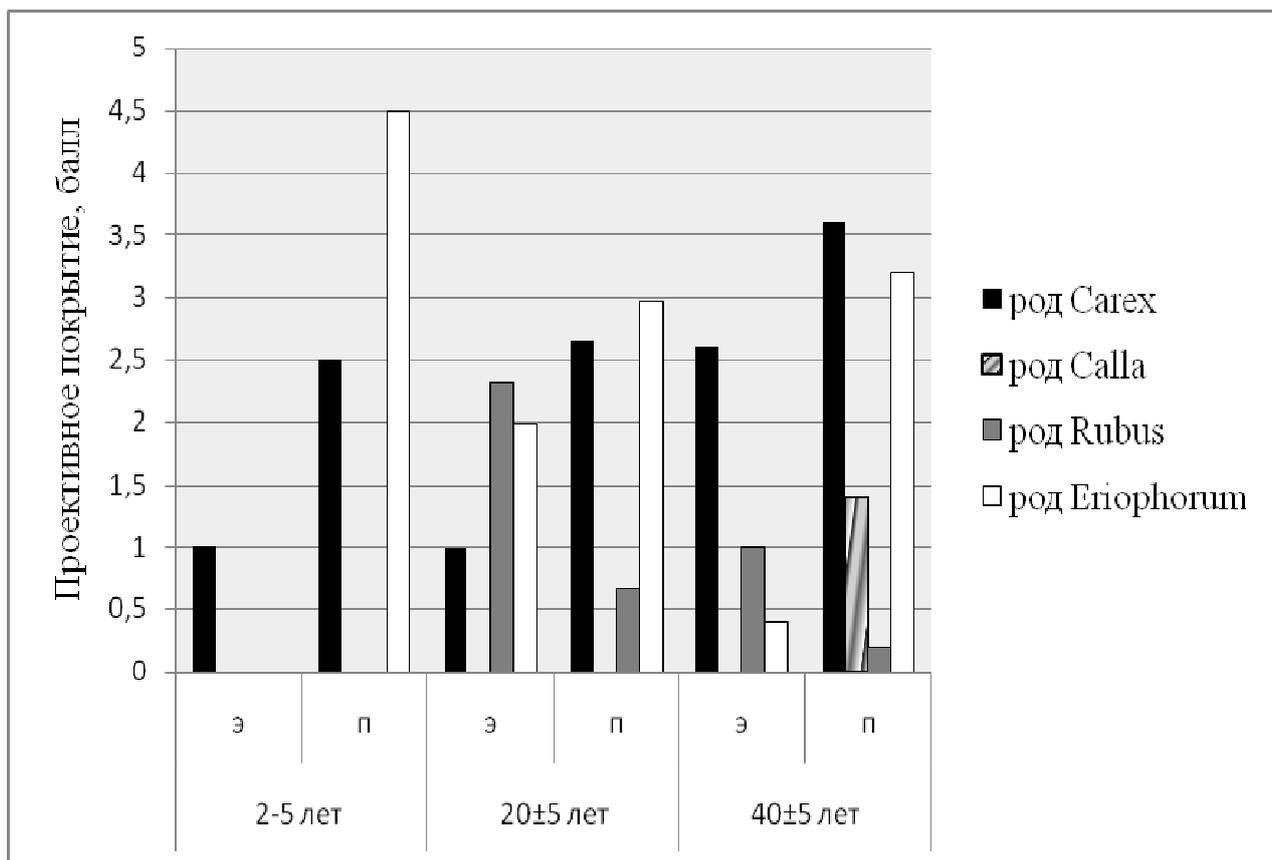


Рис. 2. Распределение видов рода Carex, Eriophorum, Calla, Rubus по значению проективного покрытия на подтопленных и эталонных участках (Э - эталонный, П - нарушенный)

### Заключение

В заключение можно сделать вывод, что на всех подтоплениях со временем наблюдается увеличение проективного покрытия в травяном ярусе комплекса влаголюбивых осок и пушиц, а сфагновые мхи, характерные для рямов и грядово-мочажинных комплексов, замещаются мочажинными видами. Среди мхов отмечены сфагнумы: балтийский, большой, обманчивый и центральный (рис. 2).

Установлено так же, что со временем наблюдается значимое уменьшение площади водного зеркала на участке подтопления за счет разрастания травяно-сфагновых сообществ, во времени наблюдается плавный переход ареалов трансформации растительности от нарушенного участка к контрольному (Миляева, 2013). К сорока годам водное зеркало изучаемых подтоплений на 90 % зарастает гидрофитными видами сфагновых мхов, осок и пушиц (рис. 3).

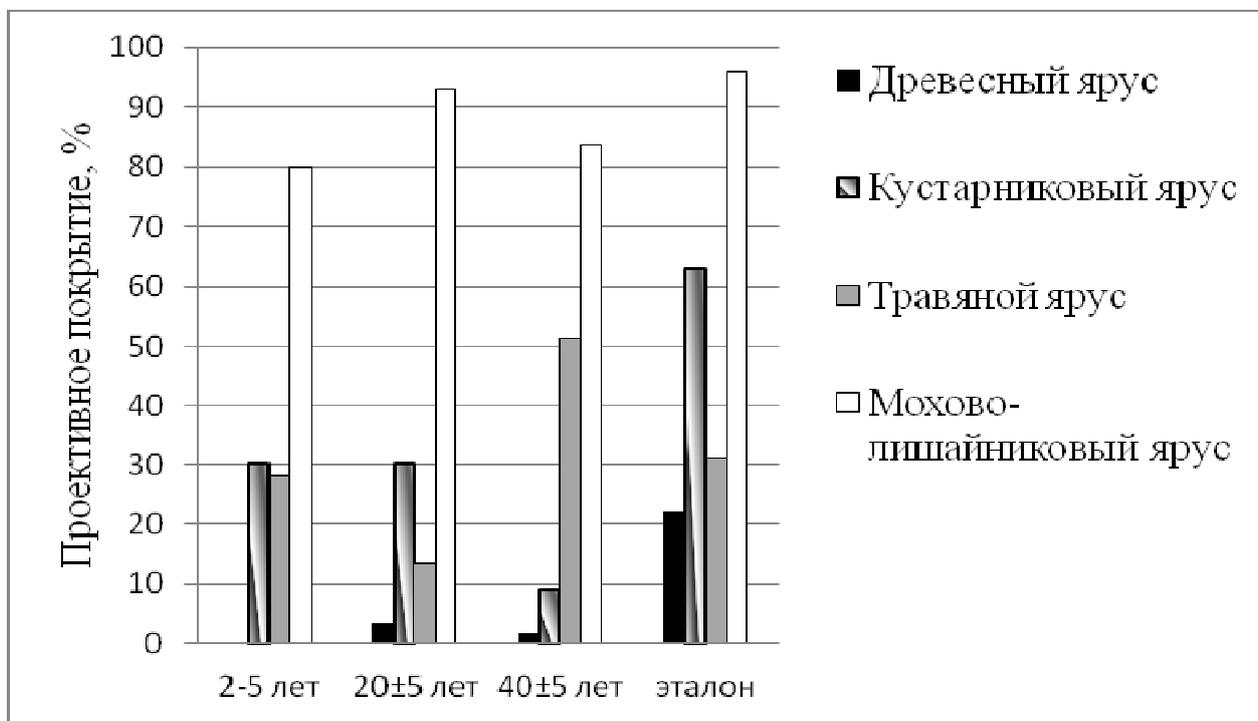


Рис. 3. Возрастная динамика восстановления ярусов растительного покрова в болотной экосистеме таежной зоны Западной Сибири

Вышеизложенные данные по выделенным индикаторам подтопления позволяют сделать вывод о том, что растительная индикация инженерно-геологических условий в районах переувлажненных территорий возможна и перспективна, так как процессы определения сферы воздействия подтоплений, тщательный анализ их строения и более глубокая интерпретация полученных результатов позволит оценить направленность и темпы процесса подтопления. Таким образом, индикатором становятся вся структура растительного покрова исследуемого болотного массива. Растительная индикация в районах подтопления имеет не только практическое, но и теоретическое значение, так как приближает нас к поиску новых путей рационального природопользования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сулейманов Р.С., Кульков А.Н., Чигир В.Г. Экологическая обстановка в районах нефтегазового освоения севера Западной Сибири (на примере Надым-Пур-Тазовского региона) // Проблемы общей и прикладной геоэкологии Севера: Сборник статей. М.: Изд-во МГУ. - 2001. С. 335–343.

2. Садов А. П. Общие направления трансформации почвенного покрова в районах добычи углеводородного сырья в лесотундре Западной Сибири // Проблемы природопользования в районах со сложной экологической ситуацией : сборник статей. Тюмень. – 2003. С. 154–156.
3. Сорокина Н. В. Антропогенное изменение северо-таежных экосистем Надымского района Западной Сибири // Материалы Московского центра Русского географического общества. Биогеография. – 2003. – Вып. 11. – С. 33–39.
4. Казанцева М.Н. Продуктивность сосновых лесов средней тайги под влиянием нефтяного загрязнения и подтопления территории // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. – 2008. – № 8. – С. 124–130.
5. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири // Под ред. С.М. Новикова: Сб. статей. СПб.: ВВМ, 2009. - 536 с.
6. Шишконокова, Е. А.; Аветов, Н. А.; Березина, Н. А.; Толпышева, Т. Ю.; Шведчикова, Н. К. Проявления регрессивных процессов на болотах южной части природного парка Нумто (ХМАО - Югра) // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. – 2016. – Т. 121, вып. 3. – С. 39–50.
7. Канцерова Л. В. Разнообразие и динамика сообществ трансформированных гидроморфных биотопов среднетаежной Карелии : Автореф. дис. канд. биол. наук. – Петрозаводск, 2012. – 23 с.
8. Беспалова Т. Л. Закономерности антропогенной трансформации растительности природного парка «Кондинские озера» // Вестник Тюменского государственного университета. - 2010. – № 3. – С. 25–34.
9. Васильев С.В. Воздействие нефтегазодобывающей промышленности на лесные и болотные экосистемы. – Новосибирск : Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 136 с.
10. Соромотин А.В. Экологические проблемы нефтегазодобычи в Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. – 2005. – № 3. – С. 137–145.
11. Миляева Е.В. Влияние дорожных сооружений на болотные геосистемы лесотундровой и таежной зон Западной Сибири: Автореф. дис. канд. геогр. наук. – Томск, 2013. - 20 с.
12. Миронычева-Токарева Н.П., Михайлова Е.В., Вишнякова Е.К. Трансформация растительного покрова болотных экосистем при строительстве дорожного полотна (на примере таежной зоны Западной Сибири) // Вестник оренбургского государственного университета. – 2017. - № 12 (212). С. 55-59.
13. Антропогенная нагрузка на лесотундровые экосистемы при прокладке линейных сооружений / Е. В. Михайлова, И. Д. Махатков, Н. П. Миронычева-Токарева, Н. Г. Коронатова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 175–179.
14. Викторов С. В., Ремезова Г. Л. Индикационная геоботаника : учеб. пособие. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 168 с.

## REFERENCES

1. Suleymanov P. C., Kulkov A. N., Chigir V. G. Ecological situation in the areas of oil and gas settlement of the North of Western Siberia (by the example of Nadym-PUR-Tazovsky region) // Problems of General and applied Geoecology of the North: Collection of articles. M.: Publishing house of Moscow state University. – 2001. S. 335–343.
2. Sadov A. P. General directions of soil cover transformation in areas of hydrocarbon production in the forest tundra of Western Siberia // problems of nature management in areas with difficult environmental situation: Collection of articles. Tyumen. – 2003. – P. 154–156.

3. Sorokina N.V. Anthropogenic change of the North-taiga ecosystems of Nadym district of Western Siberia // Materials of the Moscow center of the Russian geographical society. Biogeography. - 2003. - Vol. 11. - S. 33-130.
4. Kazantseva M. N. Productivity of pine forests in middle taiga under the influence of oil pollution and flooding areas // Vestnik of ecology, forestry and landscape. - 2008. - No. 8. - S. 124-130.
5. Hydrology of wetlands in areas of permafrost of West Siberia // Under the editorship of S. M. Novikov: Sat. articles. SPb.: WWM, 2009. - 536 p.
6. Shishkanova, E. A.; Avetov, N. A.; Berezina, N. A.; Tolpysheva, T. Y.; Shvedchikova, N. K. Manifestations of regressive processes in the marshes of the southern part of natural Park Numto (KHAMAO - Yugra) // Bulletin of Moscow society of naturalists. Department of biological. - 2016. Vol.121, no. 3. - P. 39-50.
7. Kantserova L. V. Diversity and community dynamics of the transformed hydromorphic habitats of the middle taiga of Karelia : abstract. dis. kand. Biol. sciences'. - Petrozavodsk, 2012. - 23 p.
8. Besspalova, T. L. Patterns of anthropogenic transformation of the vegetation of the natural Park "Kondinsk lake" // Vestnik of Tyumen state University. - 2010. - No. 3. - P. 25-34.
9. Vasiliev S. V. Impact of oil and gas industry on forest and marsh ecosystems. - Novosibirsk: Science. Siberian enterprise of RAS. 1998. 136 p.
10. Soromotin A. V. Ecological problems of oil and gas production in Western Siberia // Bulletin of the Tyumen state University. - 2005. - No. 3. - P. 137-145.
11. Milyaeva E. V. Influence of road construction on the swamp geosystems of taiga and forest-tundra zones of Western Siberia: abstract. dis. kand. Geographical sciences. Tomsk 2013/- 20p.
2. Mironycheva-Tokareva N. P. Mikhailova E. V., Vishnyakova E. K. transformation of the vegetation cover of marsh ecosystems in the construction of the roadway (on the example of the taiga zone of Western Siberia). Vestnik orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. - 2017. - No. 12 (212). C. 55-59.
13. Mikhailova E. V., Makhatkov I. D., Mironycheva-Tokareva N. P. Koronatova N. G. Anthropogenic load on forest-tundra ecosystems during the laying of linear structures // Interexpo GEO-Siberia-2017. XIII international. science. congressional., 17-21 April 2017, Novosibirsk:international. science. Conf. "Remote sensing of the Earth and photogrammetry, environmental monitoring, Geoecology": collection of materials V 2 t. T. 2. – Novosibirsk: SSGA, 2017. – P. 175 - 179.
14. Viktorov S. V., Remezova G. L. Indicative geobotany: Studies. benefit. - Moscow: Publ. Mosk. Univ/, 1988. - 168 p.

© *Е. В. Михайлова, Н. П. Миронычева-Токарева, Е. А. Сайб, Б. В. Миляев, 2018*

## **СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА 30 ЛЕТ**

*Геннадий Павлович Мартынов*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры высшей математики, тел. (383)343-25-77, e-mail: martynov@ssga.ru

*Анастасия Викторовна Могильникова*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, студент, тел. (951)384-48-51, e-mail: mogilnikova\_nastya@mail.ru

Авторы статьи анализируют некоторые зависимости метеорологических данных по Московской области за период с 1983 по 2012 г.г., которые стали доступны благодаря принятому Закону «Об экологическом мониторинге в городе Москве». Выявляются тенденции изменений трех факторов среды во времени, проверяются гипотезы о нормальности распределения данных каждого из трех факторов. Кроме того исследуются парные зависимости этих данных между собой, строятся графики линейной регрессии зависимых факторов и изучается разброс данных относительно этих теоретических графиков. По итогам исследований делаются выводы о положительном влиянии проводимых природоохранных мероприятий в данном регионе и предлагаются рекомендации для жителей Московской области по сохранению своего здоровья в теплое время года.

**Ключевые слова:** статистический анализ, метеорологические данные, нормальный закон распределения, коэффициент корреляции, критерий согласия, линия регрессии, диаграмма рассеяния.

## **STATISTICAL ANALYSIS OF CHANGES IN METEOROLOGICAL DATA OF MOSCOW REGION FOR 30 YEARS**

*Gennadiy P. Martynov*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, phone: (383)343-25-77, e-mail: martynov@ssga.ru

*Anastasia V. Mogil'nikova*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Student, phone: (951)384-48-51, e-mail: mogilnikova\_nastya@mail.ru

The authors analyze dependence of meteorological data on the Moscow Region for the period from 1983 to 2012, which became available thanks to the adopted Law «On Environmental Monitoring in Moscow». First, the trends of changes of three environmental factors in time are revealed; hypotheses about the normality of the distribution of data of each of the three factors are checked. In addition, the pair dependences of these data among themselves are investigated, the graphs of linear regression of dependent factors are constructed, and the spread of data rela-

tive to these theoretical graphs is studied. According to the results of the research conclusions about the positive impact of environmental protection activities in the region are made and recommendations for residents of the Moscow Region to preserve their health in the warmer months are offered.

**Key words:** statistical analysis, meteorological data, normal distribution law, correlation coefficient, goodness of fit, regression line, scatter plot.

20 октября 2004 г. был принят Закон [1] «Об экологическом мониторинге в городе Москве». Основные цели принятия этого Закона:

- 1) соблюдение установленных нормативов качества окружающей среды;
- 2) получение объективных данных о состоянии окружающей среды, на основе которых обеспечивается градостроительное планирование, планирование транспортных систем, землепользования и хозяйственной деятельности, а также проводится социально-гигиенический мониторинг;
- 3) выявление источников загрязнения окружающей среды и определение их вклада в загрязнение;
- 4) информирование населения о состоянии окружающей среды;
- 5) оценка эффективности проводимых природоохранных мероприятий, а также мероприятий в области градостроительного планирования и развития транспортного комплекса.

Знание объективных данных об окружающей среде [2] очень важно, например, при планировании экономического развития территорий [3], при паспортизации природных объектов [4], а также при расчете устойчивости природных систем [5]. Кроме этого, выявление источников загрязнения окружающей человека среды используется при оценке экологических параметров [6] различных территорий и формировании основ рационального землепользования [7], а также при создании различных моделей рационального природопользования [8, 9]. Дополнительно к сказанному, можно отметить, что влияние источников загрязнения атмосферы при изменении температурного поля существенно сказывается на формировании процессов в облаках [10].

Авторы работы на основе 30-летних (с 1983 по 2012 гг.) метеорологических данных [11] по Московской области попытались оценить динамику изменений только трех факторов среды: температуры воздуха (фактор X), относительной влажности воздуха (фактор Y) и содержания кислорода в воздухе (фактор Z). При этом проверялись гипотезы о нормальном типе распределения каждого фактора, а также выявлялись возможные парные зависимости факторов между собой. Кроме того, строились графики линейной регрессии, и изучался разброс данных относительно этих графиков.

На рис. 1 приводится динамика среднемесячных температур (в градусах по Цельсию) по годам. На диаграмме отчетливо видно, что январские температуры в Московской области практически всегда являются далеко не зимними. Следуя этой тенденции, новый 2018 год москвичи встретили без снега и при положительной температуре.

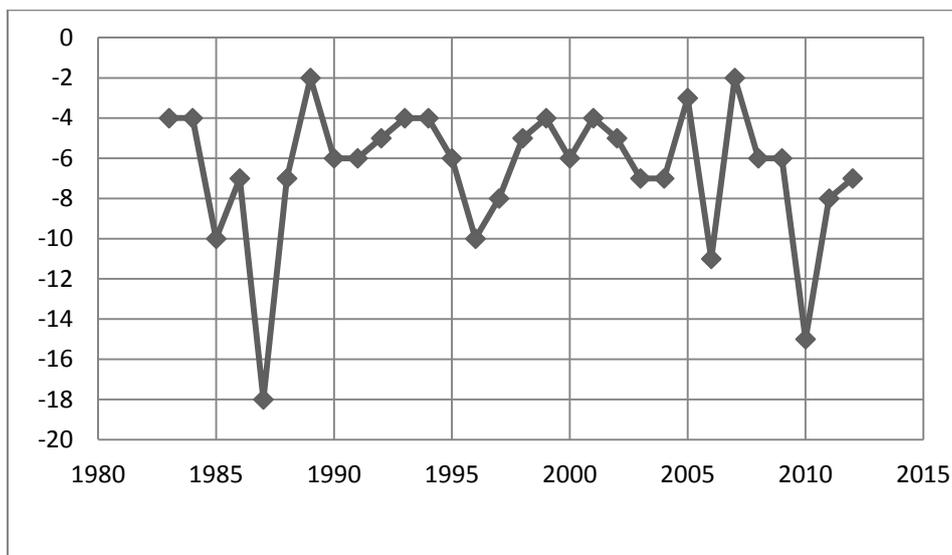


Рис. 1. Динамика по годам фактора X (январь)

На рис. 2 приводится динамика среднемесячной относительной влажности (в процентах) воздуха по годам. На диаграмме отчетливо видно, что средняя влажность воздуха мало меняется по годам. Аналогичная динамика для влажности прослеживается с февраля по сентябрь включительно.

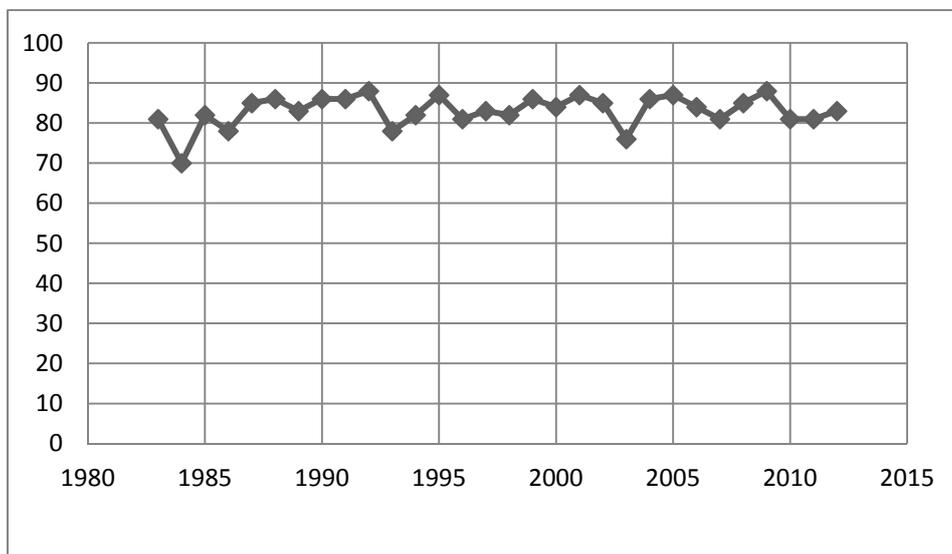


Рис. 2. Динамика по годам фактора Y (февраль)

На рис. 3 приводится динамика среднемесячного содержания кислорода (г/куб. м) в воздухе по годам. На этой диаграмме с 2007 г. отчетливо прослеживается тенденция повышения содержания кислорода в воздухе Московской области. Возможно, что принятый в 2004 г. закон о мерах по улучшению экологической обстановки в Москве и Московской области начал приносить свои плоды.

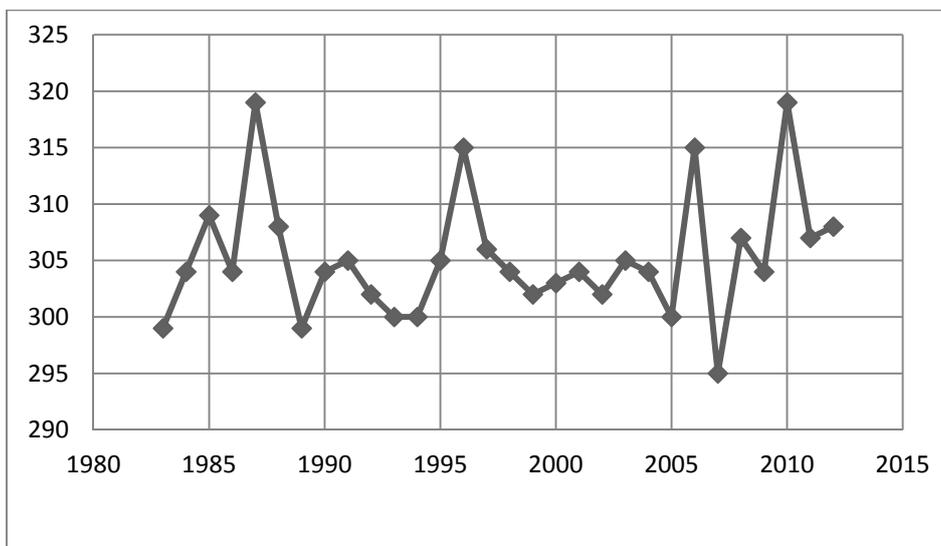


Рис. 3. Динамика по годам фактора Z (январь)

Следующим этапом исследований была проверка данных наблюдений по всем трем факторам (X, Y, Z) на нормальность законов их распределений. Сначала проводилось визуальное сравнение «гистограмм» частот наблюдаемых факторов с расчетной «увеличенной» кривой Гаусса. В качестве примера можно рассмотреть «гистограмму» частот фактора Y (влажность) за ноябрь месяц (рис. 4) по данным за период с 1983 по 2012 гг.

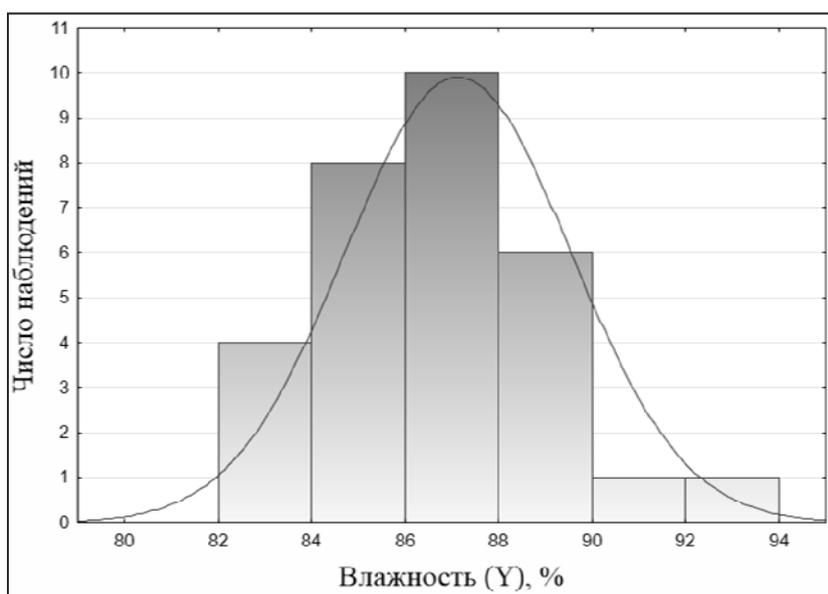


Рис. 4. Фактор Y (ноябрь)

Далее методом, изложенным в исследовании [12], проводилась более точная проверка нормальности распределений с помощью критерия согласия  $\chi^2$ . Результатом этой проверки явилось следующее: 1) содержание кислорода

во всех месяцах распределено по нормальному закону; 2) влажность и температура распределены по нормальному закону (за исключением июля). В дальнейших расчетах июль месяц исключен полностью по все трем факторам.

Следующим этапом исследований была проверка гипотез о парной корреляции данных трех факторов с помощью коэффициента парной корреляции.

В результате выяснилось, что пара X,Y (температура и относительная влажность) и пара Y, Z (относительная влажность и содержание кислорода) практически не коррелируют ни в одном из месяцев. А вот пара X, Z (температура и содержание кислорода) дают хорошую корреляцию, кроме августа месяца. В остальные месяцы их коэффициент корреляции изменялся в пределах от (-0,9484) до (-0,6055).

Последним этапом исследований стало построение графиков линейной регрессии факторов X, Z и изучение разброса данных наблюдений относительно этих графиков. На рис. 5 приводится диаграмма рассеяния за январь месяц. На диаграмме прослеживаются не очень сильные отклонения данных наблюдений относительно теоретической линии регрессии факторов X, Z. Аналогичные небольшие отклонения данных наблюдений прослеживаются и в диаграммах рассеяния за ноябрь, декабрь и февраль месяцы, что совпадает с результатами исследований [12]. В остальные месяцы года разброс данных наблюдений увеличивается (по всей видимости, появляются новые неучтенные факторы среды, которые проявляются только в более теплое время года).

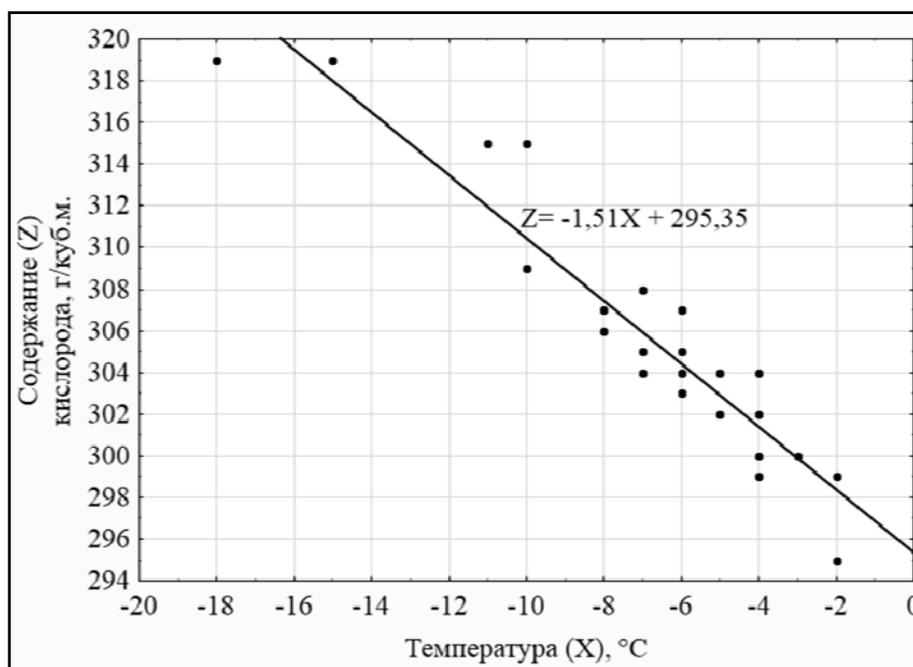


Рис. 5. Диаграмма рассеяния (январь)

Исследуя уравнение парной линейной регрессии (рис. 5) для января месяца, можно сделать прогноз: при увеличении средней температуры января, например, на 10 градусов, содержание кислорода в 1 куб. м воздуха уменьшится

на 15 г. Кроме этого точечного прогноза можно найти доверительные интервалы [13, 14], где с заданной надежностью будет находиться значение интересующего нас фактора  $Z$ , если известен диапазон изменения средней температуры  $X$  месяца.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Все исследованные три фактора среды распределены, в основном, по нормальному закону распределения;

2. Динамика изменения относительной влажности воздуха в московском регионе по годам показывает небольшие колебания относительно среднего значения (более 80 % в феврале – это довольно высокая влажность);

3. Динамика изменения среднемесячных температур в регионе обозначает тенденцию повышения (в сторону плюсовых значений) в январе месяце;

4. Динамика изменения среднемесячного содержания кислорода в воздухе обозначает тенденцию увеличения (более 300 г/куб. м или более 22 % в относительных величинах в расчете на конкретную среднюю температуру месяца), что в свою очередь может быть объяснено положительным эффектом проводимых в регионе мероприятий [1] по экологическому мониторингу окружающей среды;

5. В зимние месяцы прослеживается устойчивая корреляционная связь содержания кислорода и температуры воздуха: с увеличением температуры содержание кислорода падает, и, наоборот, при понижении температуры содержание кислорода увеличивается (как и в работе [12]).

6. В теплое время года, учитывая обратную зависимость содержания кислорода от температуры воздуха, рекомендуется больше бывать на природе, либо принимать кислородные коктейли, дабы не допустить кислородного голодания организма.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Закон г. Москвы от 20 октября 2004 г. № 65 «Об экологическом мониторинге в городе Москве» / Система ГАРАНТ : <http://base.garant.ru/382169/#ixzz56E3JeWKY>.

2. Анопченко Л. Ю., Луговская А. Ю. Использование различных методов для экологического мониторинга атмосферного воздуха // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 84–88.

3. Огулов А. С., Креймер М. А., Турбинский В. В. Значение гигиены атмосферного воздуха в экономическом и территориальном планировании // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 111–128.

4. Зятькова Л. К., Лесных И. В. Геоэкологическая паспортизация природных объектов как инструмент учета и анализа параметров современных геологических процессов // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 114–123.

5. Ряполова Н. Л. Условия формирования ресурсов тепла и влаги как основы функционирования и устойчивости природных систем Западно-Сибирского Севера // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 271–281.

6. Попова Н. Б., Ряполова Н. Л. Оценка эколого-географических параметров ландшафтных провинций Западно-Сибирского севера // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 228–239.

7. Жарников В. Б., Ван А. В. Геоэкологические основы рационального землепользования // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 176–183.
8. Николаева О. Н. Использование картографических моделей природных ресурсов на различных этапах ведения рационального природопользования // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 79–86.
9. Якутин, М. В. Microbial biomass and soil organic carbon accumulation on a former lakebed near Novosibirsk, Russia / М. В. Якутин, Л. Ю. Анопченко, Ф. Конен // Journal of plant nutrition and soil science. – 2016. – Vol. 179, № 2. – pp. 190–192.
10. Conen, F.; Yakutin, M.V.; Yttri, K.E.; Hüglin, C. Ice nucleating particle concentrations increase when leaves fall in autumn / F. Conen [и др.] // Atmosphere. – 2017. – Vol. 8, № 10. – pp. 202–210.
11. Статистика городов России [Электронный ресурс] / Статистика погоды по годам; ред. Кравцев Л.С. – Режим доступа: <http://www.atlas-yakutia.ru>, свободный.
12. Мартынов Г. П., Анопченко Л. Ю., Богданова Н. С. Статистический анализ некоторых зависимостей климатических данных Новосибирской области за 36 лет // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 57–62.
13. Мартынов Г. П., Луговская А. Ю. О достоверности некоторых статистических оценок в биоиндикационных исследованиях // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 184–188.
14. Редикарцева Е. М., Карпик П. А. Математическое моделирование зависимости уровня воды в реке Оби в городе Новосибирске от сброса воды на Новосибирской ГЭС // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 237–242.

## REFERENCES

1. Law of Moscow of October 20, 2004, № 65 «On environmental monitoring in the Moscow city» / GARANT System: <http://base.garant.ru/382169/#ixzz56E3JeWKY>
2. Anopchenko, L. Y., Lugovskaya, A. Y. (2014). The use of different methods for environmental monitoring of atmospheric air. In Sbornik materialov Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Interekspo GEO-Sibir'-2014. X Mezhdunarodnoj nauchnyj kongress. Vol. 2. «Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geokologiya» [Proceedings of International Scientific Conference: Inter-Expo GEO-Siberia-2014. X international scientific Congress: International scientific conference: Remote sensing methods and photogrammetry, environmental monitoring, Geoecology] (pp. 84–88). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
3. Ogudov, A. S., Kreymer, M. A. & Turbinsky, V. V. (2015). Ecological disaster and emergency planning zones in territory management. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 1(29), 111–128 [in Russian].
4. Zyatkova, L. K., Lesnykh, I. V. (2015). Geological classification of natural objects for taking into account and analysis of current geological processes characteristics. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 2(30), 114–123 [in Russian].
5. Ryapolova, N.L. (2017). The conditions of formation of resources of heat and moisture, as the functioning and sustainability of the natural systems of the west Siberian north. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], Vol. 22, № 1, 271–281 [in Russian].

6. Popova, N.B., Ryapolova, N.L. (2017). Estimation of geographical parameters of landscape provinces in west-north Siberia. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], Vol. 22, № 3, 228–239 [in Russian].
7. Zharnikov, V.B., Van, A.V. (2016). Geo-ecological bases of rational land use. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 4(36), 176–183 [in Russian].
8. Nikolayeva, O.N. (2015). Application of cartographic models of natural resources at different stages of environmental management. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 3(31), 79–86 [in Russian].
9. Yakutin, M.V., Anopchenko, L. Y. & Conen, F. (2016). Microbial biomass and soil organic carbon accumulation on a former lakebed near Novosibirsk // Journal of plant nutrition and soil science, Vol. 179, № 2, 190–192.
10. Conen, F., Yakutin, M.V., Yttri, K.E. & Hüglin, C. (2017). Ice nucleating particle concentrations increase when leaves fall in autumn // Atmosphere, Vol. 8, № 10, 202–210.
11. Statistics of the cities of Russia [Electronic resource] / Weather statistics for years; Kravtsev L. S. (Ed.) – Mode of access: <http://www.atlas-yakutia.ru> free.
12. Martynov, G. P., Anopchenko, L. Y. & Bogdanova, N. S. (2017). Statistical analysis of some climatic data dependencies of the Novosibirsk region for 36 years. In Sbornik materialov Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Interekspo GEO-Sibir'-2017. XIII Mezhdunarodnoj nauchnyj kongress. Vol. 2. «Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geokologiya» [Proceedings of International Scientific Conference: Inter-Expo GEO-Siberia-2017. XIII international scientific Congress: International scientific conference: Remote sensing methods and photogrammetry, environmental monitoring, Geoecology] (pp. 57–62). Novosibirsk: SGUGiT Publ. [in Russian].
13. Martynov, G. P., Lugovskaya, A. Y. (2012). About the reliability of certain statistical estimates in bioindication studies. In Sbornik materialov Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Interekspo GEO-Sibir'-2012. VIII Mezhdunarodnoj nauchnyj kongress. Vol. 2. «Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geokologiya» [Proceedings of International Scientific Conference: Inter-Expo GEO-Siberia-2012. VIII international scientific Congress: International scientific conference: Remote sensing methods and photogrammetry, environmental monitoring, Geoecology] (pp. 184-188). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
14. Redikarceva, E.M., Karpik, P.A. (2017). Mathematical modeling of the dependence of the water level in the Ob River in Novosibirsk from the water reset at the Novosibirsk hydroelectric power station. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], Vol. 22, № 4, 237–242 [in Russian].

© Г. П. Мартынов, А. В. Могильникова, 2018

## **СПЕКТР РАЗМЕРОВ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДЫМОВОЙ ЭМИССИИ ПРИ УФ ОБЛУЧЕНИИ В РЕЖИМЕ ТЛЕЮЩЕГО ГОРЕНИЯ ЛЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### ***Валерий Иванович Макаров***

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дисперсных систем, тел. (383)333-07-87, e-mail: makarov@kinetics.nsc.ru

### ***Светлана Анатольевна Попова***

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, младший научный сотрудник лаборатории дисперсных систем, тел. (383)333-07-87, e-mail: popova@kinetics.nsc.ru

### ***Сергей Николаевич Дубцов***

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории наночастиц, тел. (383)333-15-19, e-mail: dubtsov@kinetics.nsc.ru

### ***Мария Евгеньевна Плохотниченко***

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант, тел. (383)333-15-19, e-mail: dubtsov@kinetics.nsc.ru

Представлены результаты измерения спектра размеров и химического состава дымовой эмиссии при УФ облучении в режиме тлеющего горения лесных горючих материалов борельных лесов Сибири.

**Ключевые слова:** горение биомассы, тлеющее горение, дымовая эмиссия, вторичный органический аэрозоль, УФ облучение, спектр размеров.

## **SIZE DISTRIBUTION AND THE CHEMICAL COMPOSITION OF SMOKE EMISSION UNDER UV IRRADIATION UPON SMOLDERING COMBUSTION OF FOREST FUELS**

### ***Valerii I. Makarov***

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, 3, Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, Laboratory of Disperse Systems, phone: (383)333-07-87, e-mail: makarov@kinetics.nsc.ru

### ***Svetlana A. Popova***

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, 3, Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, Laboratory of Disperse Systems, phone: (383)333-07-87, e-mail: popova@kinetics.nsc.ru

### ***Sergei N. Dubtsov***

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, 3, Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Nanoparticles, phone: (383)333-15-19, e-mail: dubtsov@kinetics.nsc.ru

*Maria E. Plokhotnichenko*

Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate, phone: (383)333-15-19, e-mail: dubtsov@kinetics.nsc.ru

The results of size distribution and chemical composition of smoke emission under UV irradiation upon smoldering combustion of forest combustible materials of Siberian boreal forests are presented.

**Key words:** biomass burning, smoldering combustion, smoke emission, secondary organic aerosol, UV irradiation, size distribution.

### *Введение*

Горение биомассы является мощным источником загрязнения окружающей среды. По некоторым данным, из разных источников горения, включая дикие пожары и контролируемые выжигания, в атмосферу выделяется до 20–40 % по массе высокодисперсного аэрозоля [1–6]. Выделяемая при горении биомассы дымовая эмиссия, может влиять на химические, оптические и радиоактивные свойства атмосферы, на процессы облакообразования [3]. Лесные пожары являются главным фактором, вносящим существенные изменения в лесные экосистемы и разные биологические среды (почва, вода, растения). Кроме того, эпидемиологические исследования показывают связь между массовой концентрацией высокодисперсного аэрозоля с уровнем заболеваемости [1]. В России сосредоточено около 23 % лесов планеты, примерно 40 % которых находятся в Сибири. По оценкам [4, 5], ежегодно на территории России пожарам подвергаются свыше 10 млн га бореальных лесов в результате которых в атмосферу выделяется 3–10 млн т аэрозольного вещества. При длительном нахождении в дымовом шлейфе, газообразные продукты горения могут фотолитизоваться под действием солнечного УФ облучения, или окисляться  $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $OH$ , что приводит к образованию вторичного органического аэрозоля (ВОА) [7–14].

Целью работы являлось определение спектра размеров и химического состава вторичного органического аэрозоля, образующегося при УФ облучении газовой фазы в режиме тлеющего горения лесных горючих материалов.

### *Эксперименты*

В качестве объектов исследования использовались растения широко распространённые в бореальных лесах Сибири: багульник болотный (*Ledum palustre*), лишайник (*Cladonia* sp.), лиственница сибирская (*Larix sibirica*) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), а также опилки дуба (Oak tree). Подготовка растительного сырья заключалась в измельчении побегов и листьев багульника, лишайника, а также древесины сосны и лиственницы до однородного порошкообразного состояния с частицами размером менее 3 мм. Затем измельчённые образцы лесных горючих материалов (ЛГМ) высушивались на воздухе или в сушильном шкафу при температуре не выше 60–70° С в течение 6 часов.

На рис. 1 представлена схема лабораторно-стендовой установки, используя которую проводился отбор продуктов тлеющего горения растительных материалов. Аэрозоли отбирались на аэрозольные стекловолокнистые фильтры, часть газовых продуктов горения ЛГМ подавались в проточный трубчатый реактор, где подвергались УФ облучению лампой ПРК-4, а часть вымораживалась в кварцевых трубках, помещенных в сосуд Дьюара при температуре  $-50^{\circ}\text{C}$ .

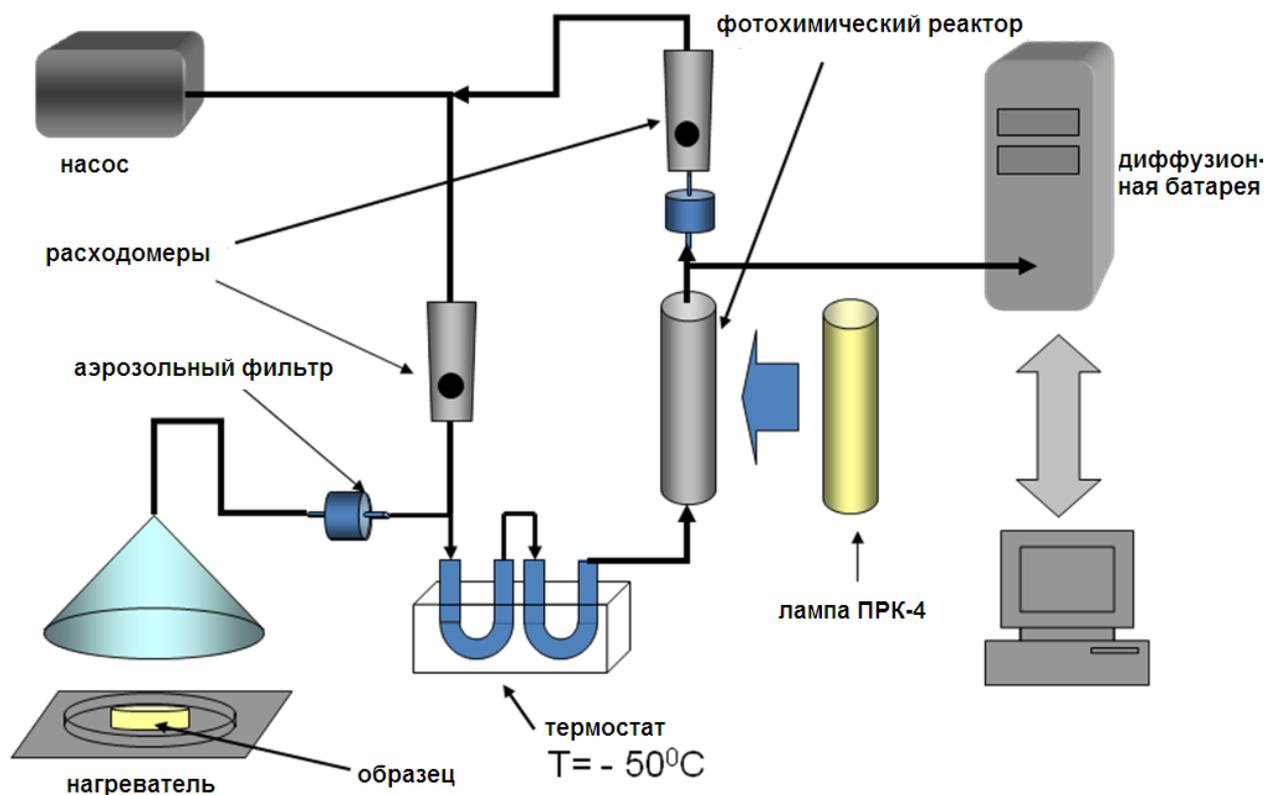


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Счетная концентрация и размер частиц определялась с помощью диффузионной батареи. Используя хромото-масс-спектрометр были получены данные о химическом составе газообразных продуктов первичной эмиссии, вторичного аэрозоля, образовавшегося в результате фотолиза газовой фазы.

### *Обсуждение*

Экспериментально показано, что при тлеющем горении сосны, лиственницы, багульника и лишайника, аэрозольная эмиссия по массе составляет 3–5 % от сгоревшего растительного материала и примерно 1–2% переходит в газовую фазу, которая определяется суммой определённых веществ, полученных при криогенном концентрировании в охлаждаемых кварцевых трубках и являющиеся прекурсорами вторичного органического аэрозоля (рис. 2). Одним из до-

минирующих компонентов дымовой эмиссии в газовой фазе является фурфурол, который относится к продуктам разложения целлюлозы.

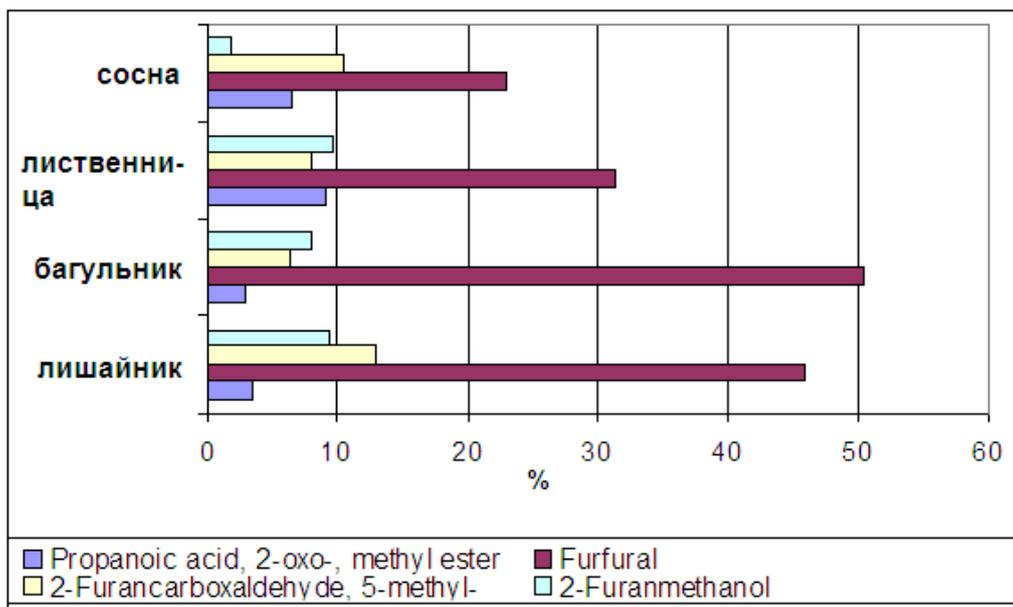


Рис. 2. Газообразные продукты дымовой эмиссии до УФ облучения

В результате УФ облучения газовых продуктов тлеющего горения растительных материалов образовались вторичные частицы с медианно-массовым диаметром около 70–100 нм с концентрацией  $10^7$  частиц/см<sup>3</sup> (рис. 3).

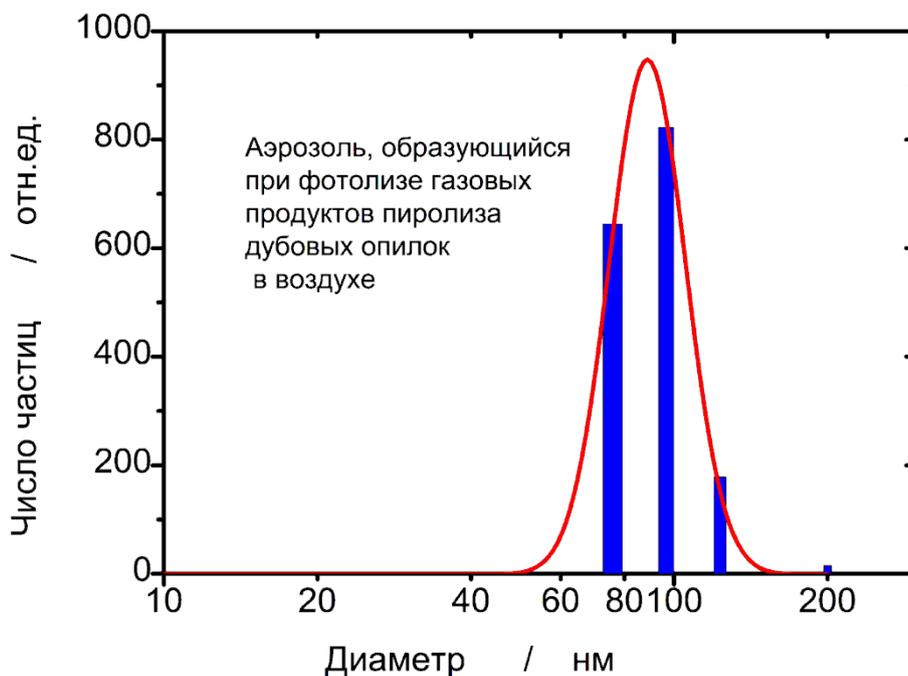


Рис. 3. Распределение размеров ВОА, образующегося при УФ облучении дымовой эмиссии опилок дуба

В составе газовых и аэрозольных продуктов фотолиза лесных материалов определены ациклические и циклические соединения с карбонильной группой ( $--C=O$ ) (сложная смесь продуктов окислительного раскрытия фуранового кольца и небольшого количества продуктов, сохраняющих фурановое кольцо). Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными в работе [15], в которой подробно описан механизм и продукты фотолиза фурфурола.

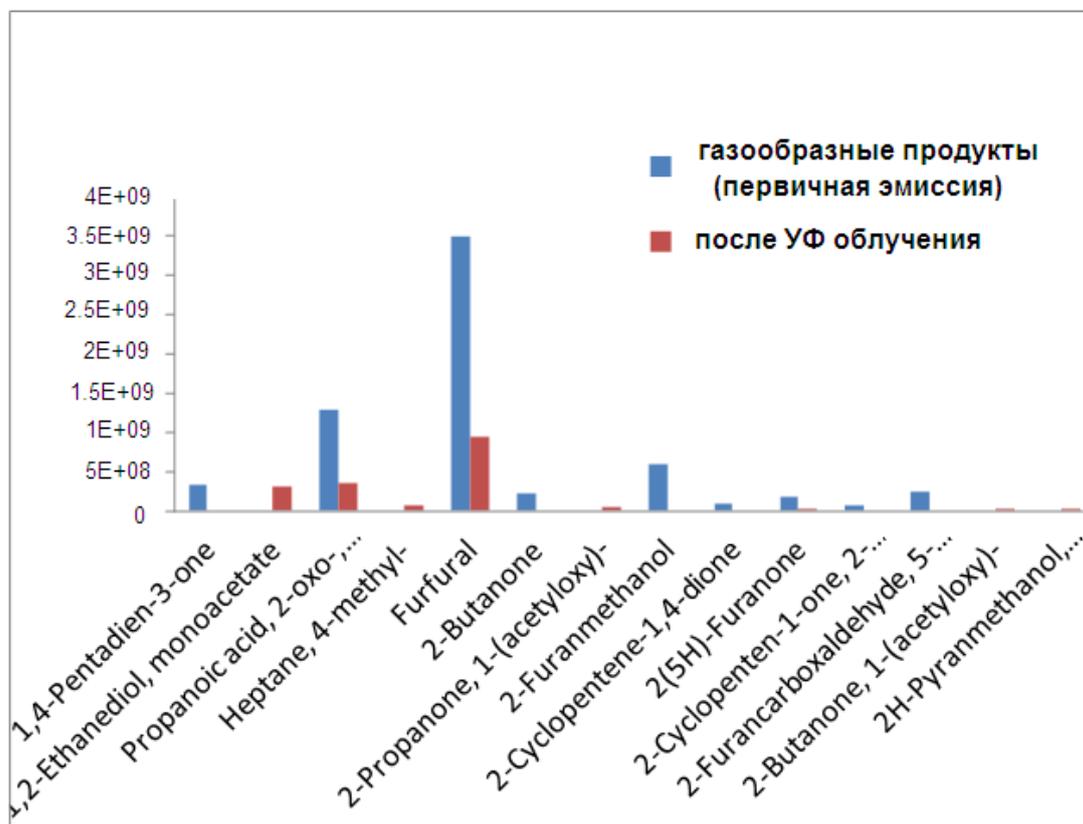


Рис. 4. Химические соединения дымовой эмиссии до и после УФ облучения

### Заключение

Усовершенствована лабораторная установка для отбора образцов дымовой эмиссии до и после УФ облучения. Было показано, что при тлеющем горении разных лесных материалов 3–5 % переходит в аэрозольную фазу и 1–2 % выделяется в виде газовых продуктов. Основным продуктом первичной эмиссии в газовой фазе является фурфурол.

В результате УФ облучения дымовой эмиссии образуется ВОА со средним диаметром около 70–100 нм и концентрацией  $10^7$  частиц/см<sup>3</sup>. Ациклические и циклические соединения с карбонильной группой были идентифицированы в составе продуктов фотолиза газовой фазы дымовой эмиссии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hays M. D., Geron C. D., Linna K. J., Smith N. D., Schauer J. J. Speciation of gas-phase and fine particle emissions from burning of foliar fuels // *Environ. Sci. Technol.* – 2002. – V. 36, № 11. – P. 2281-2295.
2. Yan B., Zheng M., Hu Y. T., Lee S., Kim H. K., Russell A. G. Organic composition of carbonaceous aerosol in an aged prescribed fire plume // *Atmos. Chem. Phys.* – 2008. – V. 8. – P. 6381-6394.
3. Simoneit B. R. T., Rogge W. F., Mazurek M. A., Standley L. J., Hildemann L. M., Cass G. R. Lignin pyrolysis products, lignans, and resin acids as specific tracers of plant classes in emissions from biomass combustion // *Environ. Sci. Technol.* – 1993. – V. 27, № 12. – P. 2533-2541.
4. Самсонов Ю. Н., Беленко О. А., Иванов В. А. Дисперсные и морфологические характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в бореальных лесах Сибири // *Оптика атмосферы и океана.* – 2010. – Т. 23, № 6. – С. 423-431.
5. Аэрозоли Сибири / Под ред. К. П. Куценого. – Новосибирск: СО РАН, 2006.
6. Mazzoleni L. R., Zielinska B., Moosmüller H. Emissions of levoglucosan, methoxy phenols, and organic acids from prescribed burns, laboratory combustion of wildland fuels, and residential wood combustion // *Environ. Sci. Technol.* – 2007. – V. 41, № 7. – P. 2115-2122.
7. Wang G., Kawamura K., Xie M., Hu S., Cao J., An Z., Watson J. G., Chow J. C. Organic molecular compositions and size distributions of Chinese summer and autumn aerosols from Nanjing: characteristic haze event caused by wheat straw burning // *Environ. Sci. Technol.* – 2009. – V. 43, № 17. – P. 6493-6499.
8. Schauer J. J., Kleeman M. J., Cass G. R., Simoneit B. R. T. Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C<sub>1</sub>-C<sub>29</sub> organic compounds from fireplace combustion of wood // *Environ. Sci. Technol.* – 2001. – V. 35, № 9. – P. 1716-1728.
9. Edey L. A., Richards G. N. Analysis of condensates from wood smoke: components derived from polysaccharides and lignins // *Environ. Sci. Technol.* – 1991. – V. 25, № 6. – P. 1133-1137.
10. B.B. Palm, P. Campuzano-Jost, A.M. Ortega, D.A. Day, L. Kaser, W. Jud, T. Karl, A. Hansel, J.F. Hunter, E.S. Cross, J.H. Kroll, Z. Peng, W.H. Brune, and J.L. Jimenez. In situ secondary organic aerosol formation from ambient pine forest air using an oxidation flow reactor // *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 2943–2970, 2016.
11. C.J. Hennigan, M.A. Miracolo, G.J. Engelhart, A.A. May, A.A. Presto, T. Lee, A.P. Sullivan, G.R. McMeeking, H. Coe, C.E. Wold, W.-M. Hao, J.B. Gilman, W.C. Kuster, J. de Gouw, B.A. Schichtel, J.L. Collett Jr., S.M. Kreidenweis, and A.L. Robinson. Chemical and physical transformations of organic aerosol from the photo-oxidation of open biomass burning emissions in an environmental chamber // *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 7669–7686, 2011.
12. P.L. Hayes, A.G. Carlton, K.R. Baker, R. Ahmadov, R.A. Washenfelder, S. Alvarez, B. Rappenglück, J.B. Gilman, W.C. Kuster, J.A. de Gouw, P. Zotter, A.S.H. Prévôt, S. Szidat, T. E. Kleindienst, J.H. Offenberg, P. K. Ma, and J.L. Jimenez. Modeling the formation and aging of secondary organic aerosols in Los Angeles during CalNex 2010 // *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 5773–5801, 2015.
13. A.L. Sullivan, R. Ball. Thermal decomposition and combustion chemistry of cellulosic biomass // *Atmospheric Environment* 47 (2012) 133-141.
14. J. Kibet, L. Khachatryan, and B. Dellinger. Molecular Products and Radicals from Pyrolysis of Lignin // *Environ. Sci. Technol.* 2012, 46, 12994–13001.
15. Дубцов С.Н., Дульцева Г.Г., Плохотниченко М.Е., Кошляков П.В., Кобзева Т.В. Исследование кинетики фотолиза и фотохимического аэрозолеобразования фурфурала. // *Оптика атмосферы и океана.* 2017. Т. 30. № 06. С. 476–480.

© В. И. Макаров, С. А. Попова, С. Н. Дубцов, М. Е. Плохотниченко, 2018

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ И ЗАКОНА ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВ**

### ***Юрий Степанович Ларионов***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86, e-mail: larionov42@mail.ru

### ***Валерий Борисович Жарников***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры кадастра и территориального планирования, тел. (383)361-05-66, e-mail: v.b.jarnikov@ssga.ru

### ***Ольга Александровна Ларионова***

МОУ СОШ № 48, 456625, Россия, г. Копейск, ул. пр. Славы, 13А, кандидат сельскохозяйственных наук, учитель, e-mail: udl973d@yandex.ru

### ***Андрей Александрович Стуканов***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86

Основой закона плодородия почв (ЗПП) как ключевого фактора земледелия является синтез органического вещества и всей биоты в агроэкосистеме, разложение и трансформация его в сложные органо-минеральные комплексы, минерализацию, гумификацию и др. процессы. Последнее обусловлено рядом эдафитных и эпифитных процессов, имеющих прямое отношение к большому и малому круговоротам веществ в биосфере. ЗПП показывает, что плодородие почвы является возобновляемым ресурсом и высокую урожайность возделываемых культур можно получать практически без химизации, разработав новые технологические приемы в земледелии и растениеводстве. Подобные технологии на основе ЗПП способны обеспечивать не только стабильную урожайность, но и получать экологически чистую продукцию, наиболее востребованную для сохранения здоровья людей. Поэтому важно выделить основные экологические качества как земледелия, так и ЗПП, реализующего его потенциальные и реальные возможности.

**Ключевые слова:** почва, органическое вещество, минеральные элементы, гумус, биомасса, биосфера, экология, эволюция, закон плодородия почв.

## **ECOLOGICAL BASES OF AGRICULTURE AND THE SOIL FERTILITY LAW**

### ***Urij S. Larionov***

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (383)361-06-86, e-mail: larionov42@mail.ru

### ***Valeriy B. Zharnikov***

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning, phone: (383)361-05-66, e-mail: v.b.jarnikov@ssga.ru

***Olga A. Larionova***

Municipal State Funded High School № 48, 13A, Prospect Slavi St., Kopeisk, 456625, Russia, Ph. D., Teacher, e-mail: udl973d@yandex.ru

***Andrej A. Stukanov***

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (383)361-08-86

Synthesis, decomposition and transformation (mineralization, humification etc.) of organic matter in agrosystem is a basis of soil fertility law as a main factor of agriculture. The transformation is caused by number of edaphitic and epiphytic processes directly related to large and small matter circulations in biosphere. The soil fertility law demonstrates that soil fertility is a renewable resource and a high yield can be produced with little doses of chemicals, only due to new agroecological techniques. The techniques based on the soil fertility law will provide both stable yield and ecologically pure products to preserve human health. Thus it is of high importance to identify the main environmental qualities of agriculture and the soil fertility law, realizing its potential and real opportunities.

**Key words:** soil, organic matter, mineral elements, humus, biomass, biosphere, ecology, evolution, soil fertility law.

### ***Введение***

В настоящее время большинство специалистов признает факт неудовлетворительного состояния окружающей среды в России и его негативного влияния на здоровье населения и экономику страны. Причина происходящего, по их мнению, состоит в неэффективной государственной природоохранной политике в течение многих лет. Признает это и правительство, предпринимая в последние годы серьезные усилия по преодолению сложившейся ситуации в стране и в ее наиболее проблемных регионах [1, 2]. Среди первоочередных мер [3–6]: введение в действие закона о стратегическом планировании, усовершенствованное правовое и информационное обеспечение территориального планирования, экологически обоснованные требования к сбережению сельскохозяйственных угодий и земель лесного фонда. Необходимость проведения экологической экспертизы большинства подготовленных к реализации проектов и многое другое. Тем не менее, проблемная ситуация жива [7] и особенно острой остается в сельскохозяйственном производстве – в состоянии его основных угодий, прежде всего, пашни и производимой на ней продукции [8], все чаще далекой от высоких экологических стандартов.

Причин этому много, но основной является все более углубляющаяся практика химизации сельскохозяйственного производства [9]. При этом спрос на экологически чистую продукцию растет, особенно в развитых странах, пришедших к пониманию, что высокие урожаи и их качество часто не совместимы. Поэтому так важно биоземледелие [10] и лежащий в его основе Закон плодородия почв (ЗПП). Закон гласит [11]: плодородие почвы в любой агроэкологической зоне пропорционально балансу органического вещества в ней и подвиж-

ных минеральных элементов, находящихся в биосферном круговороте. Биоземледелие и ЗПП в этом смысле являются основой новой экологической доктрины сельскохозяйственного производства в отличие от традиционной, построенной в основном на химизации; интенсивном использовании минеральных удобрений, пестицидов и других химических веществ, чуждых природе и наносящих большой экологический вред окружающим растениям и животным, микроорганизмам и человеку. При этом указанные последствия химизации достаточно известны, но отказываться от наработанных теорий, многолетней практики, производства огромных объемов минеральных удобрений и кажущихся современных успехов растениеводческой науки и практики всем очень непросто, но, по-видимому, придется. Альтернатива химизации в виде биоземледелия, базирующегося на ЗПП, корнеобороте и других биологических процессах, грядет, и это – тот качественно новый рывок, так необходимый отечественному АПК – стратегической отрасли экономики России [12].

### *Экологическая основа земледелия и ее развитие на пути к биоземледелию*

Известно, что химизация сельскохозяйственного производства оказывает негативное влияние [13] на все окружающие экосистемы и здоровье населения. На долю экологических факторов приходится треть общих болезней населения в возрасте до 19 лет и около 20–25 % – всего населения, притом, что в целом ущерб от болезней оценивается в 18,9 % ВВП. По словам заместителя председателя научного совета РАН по проблемам экологии А. Яблокова, экологические проблемы только в России приносят 200 тыс. смертей в год [14].

Так что сельское хозяйство сегодня является экологически проблемной отраслью, многие детали которой часто замалчиваются. В связи с повсеместным падением плодородия почв и необходимостью разработки новых теорий и технологий, определения перспектив устойчивого развития в последние годы проделана большая работа [11–13, 15–17] по обоснованию ЗПП и биоземледелия как нового эволюционно-экологического направления развития отрасли. В основу разработок положены принципы и условия функционирования закона плодородия почв, без знания которого эффективно использовать почву как средство производства невозможно [5, 9]. Интенсификация современного сельскохозяйственного производства, базирующегося на минеральных удобрениях и пестицидах, это временный путь, требующий серьезной корректировки.

Поэтому так важно глубокое знание эволюционных законов сложнейших взаимодействий различных уровней организации материи [7, 14, 15], определяющих содержание сельскохозяйственной экологии и почвоведения, роль и значение почвы для биосферы и человечества как главного средства производства, способного обеспечить основную массу продуктов питания, и фактора круговорота веществ в биосфере [9]. И только новая парадигма, основанная на ЗПП, названная биоземледелием, базирующаяся на плодородии почвы как возобновляемом ресурсе, способна превратить сельскохозяйственную отрасль

в экономически рациональную, экологически допустимую и эволюционно вечную для всего человечества на планете Земля [14].

Биоземледелие как управляемый человеком процесс возделывания культурных растений и повышения плодородия почвы в конкретных агроэкологических условиях, основанный на взаимодействии с другими видами растений, животными, микроорганизмами, обеспечивающий их защиту от болезней, вредителей и сорных растений биологическим путем, является наиболее предпочтительным. Биоземледелие, основанное на ЗПП, базирующимся на синтезе органического вещества растениями и биогеохимическом взаимодействии такого вещества с материнской породой, выступает как эволюционно и экологически возобновляемый ресурс.

Биоземледелие [10], таким образом, представляет собой агротехнологическую систему с тремя взаимодействующими блоками: блоком корнеоборота, эдафитным и эпифитным блоками, в которых осуществляются физико-биохимические процессы кругооборотов элементов минерального питания и защиты растений, смены одних видов живых организмов другими в пищевой цепи агроэкосистемы [4, 8, 13]. В результате на выходе системы биоземледелия появляется новое эмерджентное качество – плодородие. Поэтому при эволюционно и экологически правильной организации биоземледелия плодородие выступает как возобновляемый ресурс, а сельскохозяйственная отрасль становится эволюционно и экологически управляемой, способной вечно служить и кормить Человека.

В процессе разработки системы биоземледелия сформулированный [10–12] закон плодородия почв стал естественной основой обсуждаемой нами концепции. И вот почему.

Почва является одним из важнейших компонентов биосферы, продуктом ее эволюции, а ее плодородие в любой агроэкологической зоне пропорционально балансу органического вещества в ней и подвижных минеральных элементов, находящихся в биосферном круговороте. Важнейшими процессами в агроэкосистеме являются синтез органического вещества с последующим разложением и трансформацией его части в сложные органо-минеральные комплексы.

Таким образом, появление почвы и ее плодородия обусловлено, в первую очередь, синтезом органического вещества как в масштабах биосферы, так и в конкретной агроэкологической точке ландшафта.

Сегодняшние достижения в биологии, почвоведении, микробиологии, земледелии, растениеводстве и других науках показали, что в системе факторов плодородия почв содержанию и составу органического вещества принадлежит особое место. Органическое вещество и создаваемые на его основе в результате минерализации подвижные элементы минерального питания и специфический биогеохимический компонент – гумус, при взаимодействии с биотой, отличаются глобальным воздействием на всю почвенную систему и обеспечивают ее плодородие при возделывании сельскохозяйственных растений.

В этой связи следует выделить следующие основные агро- экологические функции органического вещества почвы: питательную, структурообразователь-

ную, регуляторно-круговоротную, энергетическую, защитную и санитарно-гигиеническую. Крайне негативна дегумификация почвы, приводящая к ухудшению агрохимических, агрофизических и биологических свойств почвы, уменьшению ее буферности и устойчивости к внешним факторам, падению противоэрозийной стойкости, к снижению способности инактивировать вредные соединения, загрязняющие окружающую среду. Воздействие же гумуса на комплекс агрономических свойств почвы всегда позитивно: связывают с его важнейшей ролью в повышении потенциального плодородия, урожайности сельскохозяйственных культур и улучшении качества растениеводческой продукции. Следует отметить [3, 4, 8–13, 15, 18, 19] особую роль органического вещества почвы как основного фактора круговорота минеральных веществ в биосфере.

В связи с этим становится очевидным, что решение проблемы воспроизводства плодородия почв тесно связано с качеством управления балансом органического вещества почвы. Указанный баланс показывает интенсивность синтеза органики и направленность процессов ее минерализации, гумификации в почве и в целом в агроэкосистеме. Эти процессы являются важной характеристикой для контроля и прогнозирования состояния эффективного и потенциального плодородия почв, в процессе их сельскохозяйственного использования. Они могут быть использованы для управления почвенным плодородием в масштабах отрасли на основе ГИС мониторинга. Важность, масштабность и сложность задач управления балансом органического вещества требуют применения системного подхода и моделирования. Анализ и обобщение данных научных исследований, производственного опыта и многочисленных технологических разработок [1–13, 18, 19] показали, что в основе управления потенциальным и эффективным плодородием почв, а также балансом органического вещества почвы (приход-расход) необходимо соблюдать в биоэкологии следующие агро-экологические принципы.

1. Осуществлять контроль за органическим веществом почвы, являющимся основой ее потенциального и эффективного плодородия, формируемого на основе корнеоборота, эдафитных и эпифитных процессов и биогеохимических преобразований в различные минеральные и органо-минеральные соединения.

2. Поддерживать в почве оптимальные уровни и структуры органического вещества (содержание гумуса и негумифицированного органического и минеральных веществ).

3. Поддерживать регулирование процессов минерализации и гумификации органического вещества на основе оптимального соотношения углерода С и азота N (включением бобовых культур), являющегося одним из основных условий сохранения плодородия почв.

4. Обеспечивать для сохранения плодородия почвы постоянное обновление органического вещества в ней для осуществления процессов минерализации, гумификации, накопления гумуса и поддержания эдафитных процессов.

5. Осуществлять управление плодородием и воспроизводством органического вещества почвы путем активизации потоков вещества и энергии в системе

почва–растение–окружающая среда за счет использования методов биозащиты и разработки новых элементов систем земледелия, растениеводства, селекции и биотехнологии.

6. Осуществлять достижение запланированных урожаев сельскохозяйственных культур, получение экологически чистой продукции на основе постоянного мониторинга состояния органического вещества, минеральных элементов, гумуса почв и других показателей эффективного и потенциального их плодородия.

Комплексный подход к управлению балансом органического вещества почвы основан, таким образом, на достижении оптимальных, в т.ч. физических параметров гумусного состояния почвы, регулировании его не только внесением органических удобрений и посевом многолетних трав, но и уменьшением минерализации гумуса в результате внедрения почвозащитных обработок и поддержания в почве на оптимальном уровне содержания негумифицированного органического вещества при введении в севообороты смесей разных видов пожнивных, поукосных, промежуточных культур, применения соломы, компоста, зеленых удобрений, а также повышением минерализации и эффективности гумификации свежего органического вещества, поступающего в почву, путем обеспечения в нем оптимального соотношения C:N, что, к тому же, снижает потребность в органических и минеральных удобрениях.

### *Заключение*

Пронализировав агроэкологические функции почв, в полной мере проявляющиеся в процессе накопления органического вещества, играющего ведущую роль в формировании почвенного плодородия и условий реализации ЗПП, можно сделать вывод, что цель управления получением планируемых стабильных урожаев сельскохозяйственных культур высокого качества обуславливает обеспечение воспроизводства плодородия почв и охраны окружающей среды, являющихся главными задачами земледелия в любой агроэкологической зоне.

Главным объектом управления и мониторинга в реализации ЗПП являются: общий баланс органического вещества почвы, гумусовые вещества, негумифицированное органическое вещество, минеральные элементы и поступающее в почву свежее органическое вещество, т.е. баланс различных форм органического вещества в агроэкосистеме.

Основными технологическими приемами, средствами управления в земледелии и растениеводстве должны стать: корнеоборот, внесение в почву органических удобрений, возделывание в севооборотах смешанных посевов, в том числе сидератов на зеленое удобрение с оптимальным соотношением C: N; минимизация обработки почвы, микробиологические консорциумы, а также биометоды защиты растений, обобщенно являющиеся основными условиями эффективного использования ЗПП и получения экологически чистой продукции.

Таким образом, управляя балансом органического вещества почвы, через выращивание многочисленных видов биоты, защищая почву и возделываемые

растения биологическими методами, мы управляем ее плодородием на основе ЗПП и принципов биоземледелия в целях получения экологической чистотой сельскохозяйственной продукции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вернадский В. И. Биосфера. – М. : Мысль, 1967. – 376 с.
2. Реймерс Н. Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы, гипотезы). – М. : Журнал «Россия Молодая», 1994. – 367 с.
3. Березин Л. В., Кленов Б. М., Леонова В. В. Экология и биология почв. – Омск : Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2008. – С. 122.
4. Добровольский Г. В., Никитин Е. Д. Функции почв в биосфере и экосистемах. – М. : Наука, 1990. – 261 с.
5. Баланс углерода в черноземе выщелоченном при использовании его в различных севооборотах лесостепи Приобья / А. Н. Власенко, И. Н. Шарков, А. Г. Шепелев, Л. М. Самохвалова, А. С. Прозоров // Сиб. вестник с.-х. науки. – 2009. – № 6. – С. 5–13.
6. Ковда В. А., Розанов Б. Г. Почвоведение. – М. : Высшая школа, 1983. – Ч. 1. – 400 с. – Ч. 2. – 368 с.
7. Ларионов Ю. С. Основы эволюционной теории (Концепции естествознания и аксиомы современной биологии в свете эволюции материи) : учеб. пособие. – Омск : ИП Скорнякова Е.В., 2012. – 233 с.
8. Кленов Е. М. Гумус почв Западной Сибири. – М. : Наука, 1981. – 144 с.
9. Кирюшин В. И. Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирование агроландшафтов. – М. : «КолосС», 2011. – 443 с.
10. Ларионов Ю. С. Биоземледелие и закон плодородия почв. – Сибирская гос. геодез. академ., Омский ГАУ, Омск, 2012. – 207 с.
11. Биоземледелие – новая парадигма сельскохозяйственного производства и повышения плодородия почв / Ю. С. Ларионов, О. А. Ларионова, Е. И. Баранова, Б. В. Селезнев. – СГУГиТ, Новосибирск, 1 и 2 том. – 2016. – 288 с. и 209 с.
12. Ларионов Ю. С. Альтернативные подходы к современному земледелию и наращиванию плодородия почв (новая парадигма) // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 1 (21). – С. 49–60.
13. Овсянников Ю. А. Теоретические основы эколого-биосферного земледелия./ Ю.А. Овсянников. – Екатеринбург, изд. Уральского ГУ, 2000. – 263 с.
14. Ларионов Ю. С. Ларионова Л. М., Логинов Ю. П. Основы общей экологии и устойчивости биосферы. – Тюмень, 2009. – 442 с.
15. Орлов Д. С. Гуминовые вещества в биосфере. – М. : Наука, 1993. – С. 14.
16. Петров Н. В. Живой космос. – С-Пб : ООО «Береста», 2011. – 420 с.
17. Петров Н. В. Витакосмология основа для понимания реального знания. – С-Пб: ООО «Береста», 2013. – 388 с.
18. Сафонов А. Ф. Воспроизводство плодородия почв агроландшафтов: учебное пособие. – М.: изд-во РГАУ МСХА имени К. А. Тимирязева, 2011.– 390 с.
19. Сорокин И. Б. Возобновляемые биоресурсы повышения плодородия пахотных почв подтаёжной зоны Западной Сибири // докт. Диссерт. – Омск, 2013.

© Ю. С. Ларионов, В. Б. Жарников, О. А. Ларионова, А. А. Стуканов, 2018

## **КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА РЕГИОНА ДЛЯ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ**

*Ольга Николаевна Николаева*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86, e-mail: onixx76@mail.ru

В статье рассмотрены современные возможности использования картографического метода исследования для оптимизации картографического обеспечения рационального природопользования региона. Обоснована необходимость интеграции разнородных природно-ресурсных данных для эффективного управления природными ресурсами и планирования мероприятий по их восстановлению. Обосновано понятие природно-ресурсного геоинформационного пространства региона как инструментария для решения этой задачи, рассмотрены его основные структурные элементы. Перечислены основные виды используемых исходных данных и источники их получения. Предложено создание природно-ресурсной геоинформационной модели региона для систематизации, геоинформационного анализа и картографического моделирования природно-ресурсных пространственных данных. Охарактеризована система цифровых картографических моделей природных ресурсов региона, обеспечивающая создание картографических произведений для решения конкретных задач в сфере управления природными ресурсами. Перечислены формы визуализации созданных картографических произведений.

**Ключевые слова:** природные ресурсы, рациональное природопользование, картографирование природных ресурсов, природно-ресурсное геопространство, геоинформационное моделирование, картографическое моделирование, карты природных ресурсов, картографические модели природных ресурсов, управление природопользованием.

## **CARTOGRAPHIC MODELING OF NATURAL RESOURCE GEOSPACE FOR NATURAL RESOURCE MANAGEMENT**

*Olga N. Nikolaeva*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (383)361-06-86, e-mail: onixx76@mail.ru

The article considers state-of-the-art capabilities to use mapping methods for optimization of cartographic support of natural resources management. The necessity of integration of heterogeneous data on natural resources for efficient natural resource management and recovery is stated. The notion of natural resource geospace as an instrument for systematization, geospatial analysis and cartographic modeling of data on natural resources is given. The main sources of initial data and gathering techniques are listed. The development of regional natural resource geospatial model for systematization analysis and cartographic modeling of data on natural resources is offered. The system of digital cartographic models of regional natural resource for developing of cartographic support of natural resource management is described. The types of visualization of created cartographic products are listed.

**Key words:** natural resources, natural resource mapping, natural resource geospace, geospatial modeling, cartographic modeling, maps of natural resources, cartographic models of natural resources, natural resource management.

## *Введение*

Развитие информационных, спутниковых и ГИС-технологий обуславливает постоянное расширение возможностей в области сбора и интерпретации данных о Земле, ее отдельных географических оболочках, природных и техногенных объектах, а также о явлениях и процессах, обусловленных созидательной деятельностью человека.

Эффективное планирование и управление состоянием окружающей среды требует интегрированного анализа собираемых данных, но решение этой задачи осложняется их разнородностью: собранные сведения могут быть представлены в виде материалов дистанционного зондирования Земли, результатов тематического дешифрирования, массивов статистических данных, полученных в ходе кадастровой и инвентаризационной деятельности государственных и частных организаций и т. д. Систематизация разнородных данных в виде единой базы данных предъявляет ряд требований к этой базе, касающихся как гибкости ее структуры, так и унификации терминов, единиц измерения и прочих средств выражения атрибутивной информации, стандартизации протоколов ведения и обновления базы [1, 2]. В некоторых случаях (например, при моделировании изменений климата или оценке урожайности сельскохозяйственных культур) объем собранной информации разрастается до категории «больших данных», что обуславливает необходимость оптимизации обработки данных не только на программном, но и на аппаратном уровне [3]. Сопоставление материалов дистанционного зондирования, полученных из различных источников, может быть затруднено неоднородностью их оптического качества и различиями в подходах к их дешифрированию [4].

Интегрированное использование разнородных данных для решения задач рационального природопользования в Западной Европе отчасти упрощается благодаря функционированию INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in the European Community) – инфраструктуры пространственных данных Европейского Союза, которая координирует деятельность по получению и использованию пространственных данных [5, 6]. В России подобную роль призвана играть инфраструктура пространственных данных Российской Федерации (ИПД РФ) [7], однако ее деятельность направлена в первую очередь на обеспечение геодезических и кадастровых работ, и в меньшей степени ориентирована на сбор и систематизацию тематических (в том числе природно-ресурсных) пространственных данных. Адаптация руководящих документов, регламентирующих деятельность ИПД РФ применительно к современным задачам природно-ресурсного картографирования позволяет предложить инструментарий, обеспечивающий систематизацию, селекцию и анализ данных для обоснования оптимальных решений в области планирования и ведения природопользования региона. В качестве такого инструментария выступает природно-ресурсное геоинформационное пространство региона [8].

## *Материалы и методы*

Опора на основные принципы геоинформационного моделирования, существующую нормативную документацию в области цифрового картографирования [9, 10] и современные достижения теории и практики преобразования и использования пространственных данных для обеспечения устойчивого развития территорий [11–13] позволяет определить природно-ресурсное геоинформационное пространство региона как совокупность разнородных природно-ресурсных данных, методического аппарата и технологических решений, обеспечивающих обработку природно-ресурсных данных [8].

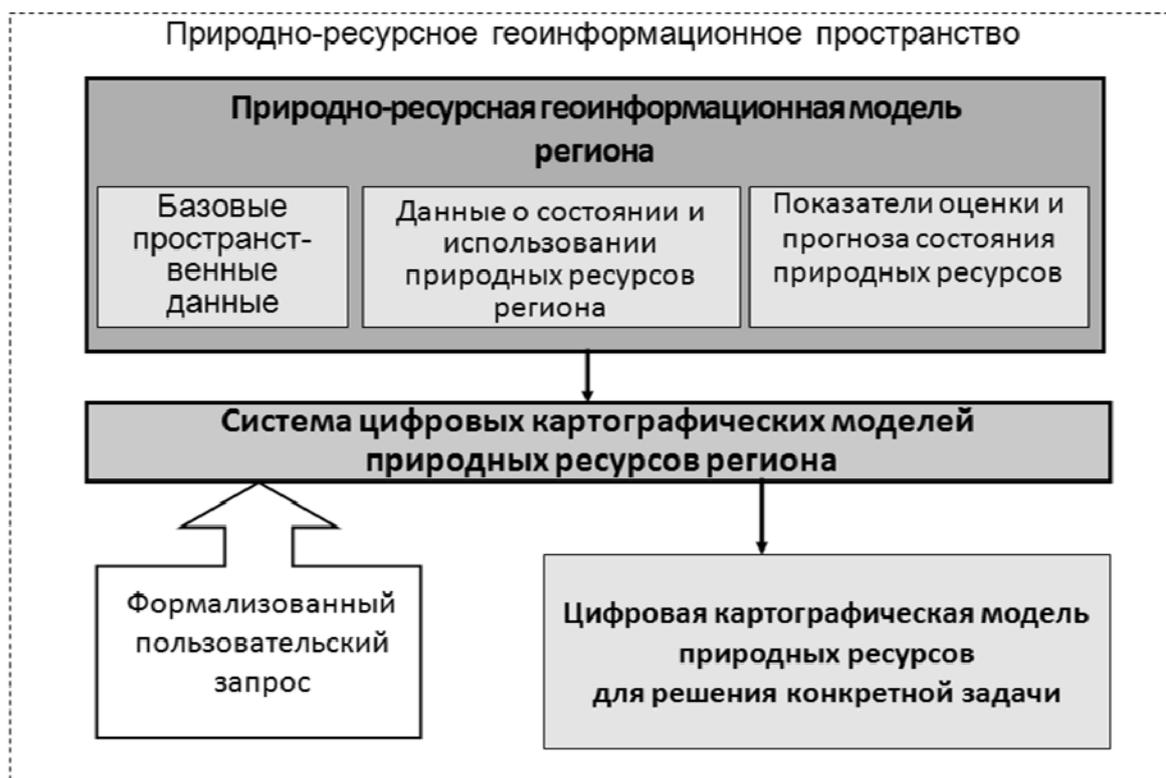
Системный анализ структурного состава природно-ресурсного геоинформационного пространства региона позволил выявить его основные компоненты:

- информационная основа: цифровая общегеографическая основа на территорию региона, актуальные пространственные данные о ресурсах основных природных компонентов региона и связанных с ними инфраструктурных объектов;
- научно-методическая основа: принципы и методики сбора, упорядочивания и интеграции разнородных природно-ресурсных данных, геоинформационного анализа и картографического представления результатов;
- технологическая основа: технологии обработки интегрированных данных и предоставления пользователю результатов в виде цифровых карт и картографических 3D-моделей;
- юридическая база: нормативно-правовая документация, регламентирующая процессы сбора, использования и предоставления пользователям природно-ресурсных данных.

Центральным элементом природно-ресурсного геоинформационного пространства региона является природно-ресурсная геоинформационная модель региона, которая используется для ГИС-анализа и моделирования разнородных природно-ресурсных данных. Ее структура представлена на рисунке [8].

Ранее выполненный анализ источников и методов сбора природно-ресурсных данных в России [14, 15] выявил следующие виды исходных данных, необходимые для построения функционирующей природно-ресурсной геоинформационной модели региона:

- базовые пространственные данные региона, сформированные в соответствии с действующими ГОСТ и ОСТ;
- массивы первичных природно-ресурсных данных, формируемые на основе материалов Государственных кадастров и реестров, которые ведутся на всей территории РФ по единым методикам и периодически обновляются. Для уточнения сведений о состоянии природных ресурсов, четко выраженных на земной поверхности (водных, лесных и т. п.) используются материалы дистанционного зондирования Земли, полученные в текущем году от лицензированных поставщиков;
- массивы производных природно-ресурсных данных, включающие в себя показатели оценки современного и прогнозного состояния природных ресурсов региона, рассчитанные с использованием первичных природно-ресурсных данных.



Основные структурные элементы природно-ресурсного геоинформационного пространства региона

Анализ и моделирование вышеперечисленных массивов данных осуществляются в среде природно-ресурсной геоинформационной модели региона. При этом используются как различные стандартные приемы геоинформационного и статистического анализа (оверлейного и сетевого анализа, анализа близости, буферизации, определения корреляционных коэффициентов, анализа динамических рядов и т. п.), так и экспертные методики для оценки перспектив хозяйственного использования конкретных природно-ресурсных объектов.

### *Результаты и обсуждение*

При обработке пространственно распределенных данных важное место занимают вопросы их визуализации в понятной и удобной конечному пользователю форме. На сегодняшний день традиционным средством визуализации как исходных пространственных данных, так и результатов их обработки являются цифровые карты. Однако в условиях постоянного совершенствования компьютерных и информационных технологий возрастает востребованность картографических 3D-моделей, которые позволяют создать более наглядное и разностороннее представление исследуемого объекта, чем двухмерные картографические произведения. Картографические 3D-модели весьма актуальны для решения задач в области управления природными ресурсами.

ми и состоянием окружающей среды, поскольку позволяют изучать конкретную территорию и находящиеся на ней объекты как фрагмент целостного трехмерного геопространства, учитывая вертикальную многослойность таких природных компонентов, как атмосферный воздух, водные объекты, недра и пр. [16–20].

Для визуализации результатов анализа и моделирования данных с использованием природно-ресурсной геоинформационной модели региона создается система цифровых картографических моделей природных ресурсов. Она представляет собой логически связанную совокупность картографических произведений, отображающих современное состояние и возможности эффективного использования ресурсов природных компонентов региона (водных, земельных, минеральных, биологических) [21]. Системное картографическое представление интегрированных данных дает возможность осуществлять многокритериальную оценку состояния отдельного вида природного ресурса [22–24] или воздействия проектируемого техногенного объекта на окружающую среду [25, 26]. Такой подход способствует оптимизации процесса принятия пространственных решений по использованию природно-ресурсного потенциала региона.

Цифровые карты и картографические 3D-модели, создаваемые в системе цифровых картографических моделей природных ресурсов региона, являются научно-справочным обеспечением для специалистов в области управления природными ресурсами региона, физических и юридических лиц, деятельность которых связана с эксплуатацией природных ресурсов, проектировщиков промышленных объектов, лиц, состоящих в общественных природоохранных и экологических организациях. Конкретная форма представления выбирается самими пользователями и включает в себя:

- традиционные цифровые или электронные карты;
- картографические 3D-модели;
- картографические анимации (двухмерные или трехмерные).

Тематическое содержание созданных картографических произведений может быть ограничено визуализацией запрошенных данных или отображать результаты оценки современного или перспективного состояния ресурса.

### *Заключение*

Картографический метод исследования предоставляет обширные возможности в области анализа и моделирования пространственных данных о природных ресурсах. Предложенный подход к разработке геоинформационного обеспечения для рационального природопользования региона обеспечивает всестороннее рассмотрение состояния природных ресурсов региона с целью получения нового знания для эффективного управления природными ресурсами. Основным средством интеграции и обработки разнородных природно-ресурсных данных является природно-ресурсная геоинформационная модель региона. Ее построение осуществляется на основе данных, собираемых российскими го-

сударственными и ведомственными кадастрами природных ресурсов. Модель обладает гибкой структурой, и позволяет расширять и дополнять ее базу данных путем внесения новых параметров и характеристик. Результирующая продукция представлена в форме цифровых картографических произведений, наглядно отображающих современное состояние и перспективы использования природных ресурсов региона.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Building a multi-scaled geospatial temporal ecology database from disparate data sources: fostering open science and data reuse / Soranno P. A., Bissell E. G., Cheruvilil K. S. et al. // *GigaScience*. – 2015. – No. 4. – pp. 28-43.
2. Composite Web Information System for Management of Water Resources / Stefanovic, N., Radojevic, I., Ostojic, A. et al. // *Water Resources Management*. – 2015. – Vol. 29. – Is. 7. – pp 2285–2301.
3. Conceptual model for environmental science applications on parallel and distributed infrastructures / Rodila D., Ray N. & Gorgan D. // *Environmental Systems Research*. – 2015. – Vol. 4. – No. 23. – pp. 1-16.
4. Organizing earth observation data inside a spatial data infrastructure / Innerebner M., Costa A., Chuprikova E. et al. // *Earth Science Informatics*. - 2017. - Vol. 10. - Is. 1. - pp 55–68.
5. Towards a cross-domain interoperable framework for natural hazards and disaster risk reduction information / Tomas R., Harrison M., Barredo J.I. et al. // *Natural Hazards*. – 2015. – Vol. 78. – Iss. 3. – pp 1545–1563.
6. ACCESS climate data management / Godøy Ø. & Saadatnejad B. // *Ambio*. – 2017. – Vol. 46. - Suppl.3. - pp 464–474.
7. Инфраструктура пространственных данных Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosreestr.ru/site/activity/infrastruktura-prostranstvennykh-dannykh-rossiyskoy-federatsii/>
8. Николаева О. Н. Природно-ресурсная геоинформационная модель региона как средство для повышения эффективности планирования и ведения природопользования // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 107–113.
9. ГОСТ Р 52055-2003. Геоинформационное картографирование. Пространственные модели местности. Общие требования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200032016>.
10. ГОСТ 34.003-90. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2\\_34.003-90](http://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_34.003-90).
11. Карпик А. П. Концепция геоинформационного пространства // *Материалы международного науч.-техн. конф., посв. 225-летию МИИГАиК. Ч. Геодезия*. – М. : МИИГАиК, 2004. – С. 434–438.
12. Карпик А. П., Осипов А. Г., Мурзинцев П. П. Управление территорией в геоинформационном дискурсе. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 280 с.
13. Карпик А. П. Перспективы развития науки, техники и технологий в сфере геодезии и картографии в российской федерации // *Геодезия и картография*. - 2015. - № 12. - С. 55-59.
14. Николаева О. Н. Об интеграции ДДЗ в ГИС для формализованной инвентаризации природно-ресурсных характеристик региона // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Международ. науч. конгр. : Международ. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.)*. – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 39–44.

15. Николаева О. Н. О совершенствовании информационного обеспечения картографирования природных ресурсов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 107–112.
16. Николаева О. Н. О проектировании тематического содержания системы цифровых картографических моделей природных ресурсов региона // Геодезия и картография. – 2016. – № 7. – С. 33–38.
17. Лисицкий Д. В., Хорошилов В. С., Бугаков П. Ю. Картографическое отображение трехмерных моделей местности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 98–102.
18. Николаева О. Н. О системном картографировании биологических ресурсов для обоснования рационального природопользования административного субъекта на примере новосибирской области // ИнтерКарто/ИнтерГИС. - 2017. - Т. 23. - № 1. - С. 297-308.
19. A unified hydrogeological conceptual model of the Milk River transboundary aquifer, traversing Alberta (Canada) and Montana (USA) / Pétré MA., Rivera A., Lefebvre R. et al. // Hydrogeology Journal. - 2016. - Vol. 24. - Is. 7. - pp 1847–1871.
20. Quantitative assessment of Urmia Lake water using spaceborne multisensor data and 3D modeling / Jeihouni M., Toomanian A., Alavipanah S.K. et al. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2017. – Vol. 11. – pp. 572–581.
21. Николаева О. Н. Картографический метод исследования в формировании единого природно-ресурсного информационного пространства России // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 4. – С. 109–113.
22. A web-based multicriteria evaluation of spatial trade-offs between environmental and economic implications from hydraulic fracturing in a shale gas region in Ohio / Liu X., Gorsevski P.V., Yacobucci M.M. et al. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2016. – Vol. 6. – pp. 376–388.
23. Forest fire risk assessment-an integrated approach based on multicriteria evaluation / Goleiji E., Hosseini S.M., Khorasani N. et al. // Environmental Monitoring and Assessment. - 2017. – Vol.11. – pp. 612-621.
24. Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques (Cote d'ivoire) / Danumah J.H., Odai S.N., Saley B.M. et al. // Geoenvironmental Disasters. – 2016. – Vol. 3. – pp. 10-19.
25. Mapping the optimal forest road network based on the multicriteria evaluation technique: the case study of Mediterranean Island of Thassos in Greece / Tampekis S., Sakellariou S., Samara F. et al. // Environmental Monitoring and Assessment. - 2015. - Vol.11. – pp. 687 – 695.
26. Prevention of landfill pollution by multicriteria spatial decision support systems (MC-SDSS): development, implementation, and case study / Khoshand A., Bafrani A.H., Zahedipour M. et al. // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. - Vol. 25. – pp. 8415-8423.

## REFERENCES

1. Soranno P.A., Bissell E.G., Cheruvilil K.S. et al. (2015). Building a multi-scaled geospatial temporal ecology database from disparate data sources: fostering open science and data reuse. *GigaScience*, 4, 28-43. <http://doi.org/10.1186/s13742-015-0067-4>.
2. Stefanovic, N., Radojevic, I., Ostojic, A. et al. (2015). Composite Web Information System for Management of Water Resources. *Water Resources Management*, 29(7), 2285–2301. <http://doi.org/10.1007/s11269-015-0941-y>.
3. D., Ray N. & Gorgan D. (2015). Conceptual model for environmental science applications on parallel and distributed infrastructures. *Environmental Systems Research*, 4(23), 1-16. <http://doi.org/10.1186/s40068-015-0050-1>.

4. Innerebner M., Costa A., Chuprikova E. et al. (2017). Organizing earth observation data inside a spatial data infrastructure. *Earth Science Informatics*, 10(1), 55–68. <http://doi.org/10.1007/s12145-016-0276-0>.
5. Tomas R., Harrison M., Barredo J.I. et al. (2015). Towards a cross-domain interoperable framework for natural hazards and disaster risk reduction information. *Natural Hazards*, 78(3), 545–563. <http://doi.org/10.1007/s11069-015-1786-7>.
6. Godøy Ø. & Saadatnejad B. (2017). ACCESS climate data management. *Ambio*, 46(3), 464–474. <http://doi.org/10.1007/s13280-017-0963-1>.
7. The Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography. (2017). *Infrastruktura prostranstvennyh dannyh Rossijskoj Federacii* [The spatial data infrastructure of the Russian Federation]. Retrieved from: <https://rosreestr.ru/site/activity/infrastruktura-prostranstvennykh-dannykh-rossiyskoy-federatsii/>
8. Nikolaeva O. N. (2016). Prirodno-resursnaya geoinformacionnaya model' regiona kak sredstvo dlya povysheniya ehffektivnosti planirovaniya i vedeniya prirodopol'zovaniya [Natural resources' geoinformation model of the region as a means to improve the efficiency of natural resources planning and management]. *Vestnik SGUGiT* [Vesnik SSUGT], 1 (33), 107–113. [In Russian].
9. Federal Agency on Technical Regulating and Metrology. (2003). GOST R 52055-2003. Geoinformacionnoe kartografirovanie. Prostranstvennye modeli mestnosti. Obshchie trebovaniya [GOST R 52055-2003. Geoinformation mapping. Spatial terrain models. General requirements]. Retrieved from: <http://docs.cntd.ru/document/1200032016>
10. Federal Agency on Technical Regulating and Metrology (1990). GOST 34.003-90. Informacionnye tekhnologii. Kompleks standartov na avtomatizirovannye sistemy. Avtomatizirovannye sistemy. Terminy i opredeleniya [GOST 34.003-90. Information Technology. Set of standards for automated systems. Automated systems. Terms and Definitions]. Retrieved from: [http://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2\\_34.003-90](http://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_34.003-90).
11. Karpik A. P. (2004). Koncepciya geoinformacionnogo prostranstva [The concept of geoinformation space]. In *Materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posv. 225-letiyu MIIGAiK. CH. Geodeziya* [Proceedings of International scientific and technical conference dedicated to the 225th anniversary of MIIGAIK.] (pp. 434–438). M. : MIIGAIK. [In Russian].
12. Karpik A. P., Osipov A. G., Murzincev P. P. (2010). Upravlenie territoriej v geoinformacionnom diskurse [Territory management in geoinformation discourse]. Novosibirsk, SSAG [In Russian].
13. Karpik A. P. (2015). Perspektivy razvitiya nauki, tekhniki i tekhnologij v sfere geodezii i kartografii v rossijskoj federacii [Prospects for the development of science, technology and technology in the field of geodesy and cartography in the Russian Federation]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and cartography], 12, 55-59 [In Russian].
14. Nikolaeva O. N. (2012). Ob integracii DDZ v GIS dlya formalizovannoj inventarizacii prirodno-resursnyh harakteristik regiona [Techniques of remote sensing data integration in GIS for formalized inventory of regional natural resources characteristics]. In *Interehkspo GEO-Sibir'–2012: VIII Mezhdunar. nauch. kongr.; Mezhdunar. nauch. konf. «Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoehkologiya»* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: Intern. sci. Conf. "Remote sensing methods of the Earth and photogrammetry, environmental monitoring, geocology"] (pp. 39–44). Novosibirsk, SSAG [In Russian].
15. Nikolaeva O. N. (2013.) O sovershenstvovanii informacionnogo obespecheniya kartografirovaniya prirodnyh resursov [Improvement of GIS dataware for natural resources mapping]. In *Interehkspo GEO-Sibir'–2013: Mezhdunar. nauch. konf. «Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoehkologiya»* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: Intern. sci. Conf. "Remote sensing methods of the

Earth and photogrammetry, environmental monitoring, geoecology"] (pp. 107–112). Novosibirsk, SSAG [In Russian].

16. Nikolaeva O. N. (2016). O proektirovanii tematicheskogo sodержaniya sistemy cifrovyyh kartograficheskikh modelej prirodnyh resursov regiona [On the design of the thematic content of the system of digital cartographic models of the region's natural resources]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and cartography], 7, 33-38 [In Russian].

17. Lisickij D. V., Horoshilov V. S., Bugakov P. Yu. (2012). Kartograficheskoe otobrazhenie trekhmernyyh modelej mestnosti [Mapping of 3D terrain models]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aehrofotos"emka* [News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography.], 2/1, 98-102 [In Russian].

18. Nikolaeva O. N. (2017). O sistemnom kartografirovanii biologicheskikh resursov dlya obosnovaniya racional'nogo prirodopol'zovaniya administrativnogo sub"ekta na primere novosibirskoy oblasti [On system mapping of biological resources for environmental management of administrated unit: a case study of the Novosibirsk region]. In *Materialy mezhdunar. nauchn. konf. InterKarto/InterGIS* [Materials of the Intern. scientific. Conf. Intercardo / Intergis.], 23 (1), (pp. 297-308). Moscow, Moscow University publishing house [In Russian].

19. Pétré MA., Rivera A., Lefebvre R. et al. (2016). A unified hydrogeological conceptual model of the Milk River transboundary aquifer, traversing Alberta (Canada) and Montana (USA). *Hydrogeology Journal*, 24(7), 1847–1871. <http://doi.org/10.1007/s10040-016-1433-8>.

20. Jekhouni M., Toomanian A., Alavipanah S.K. et al. (2017). Quantitative assessment of Urmia Lake water using spaceborne multisensor data and 3D modeling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 11, 572–581. <http://doi.org/10.1007/s10661-017-6308-5>.

21. Nikolaeva O. N. (2015). Kartograficheskij metod issledovaniya v formirovanii edinogo prirodno-resursnogo informacionnogo prostranstva Rossii [Cartographic method of research in the formation of a single natural-resource information space of Russia]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aehrofotos"emka* [News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography.], 4, 109-113 [In Russian].

22. Liu X., Gorsevski P.V., Yacobucci M.M. et al. (2016). A web-based multicriteria evaluation of spatial trade-offs between environmental and economic implications from hydraulic fracturing in a shale gas region in Ohio. *Environmental Monitoring and Assessment*, 6, 376-388. <http://doi.org/10.1007/s10661-016-5362-8>.

23. Goleiji E., Hosseini S.M., Khorasani N. et al. (2017). Forest fire risk assessment-an integrated approach based on multicriteria evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 11, 612-621. <http://doi.org/10.1007/s10661-017-6225-7>.

24. Danumah J. H., Odai S. N., Saley B. M. et al. (2016). Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques (Cote d'ivoire). *Geoenvironmental Disasters*, 3, 10-19. <http://doi.org/10.1186/s40677-016-0044-y>.

25. Tampekis S., Sakellariou S., Samara F. et al. (2015). Mapping the optimal forest road network based on the multicriteria evaluation technique: the case study of Mediterranean Island of Thassos in Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 11, 687–695. <http://doi.org/10.1007/s10661-015-4876-9>.

26. Khoshand A., Bafrani A.H., Zahedipour M. et al. (2018). Prevention of landfill pollution by multicriteria spatial decision support systems (MC-SDSS): development, implementation, and case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 8415-8423. <http://doi.org/10.1007/s11356-017-1099-3>.

© O. H. Николаева, 2018

## **ЕМКОСТЬ КАТИОННОГО ОБМЕНА ГУМУСОВОГО КОМПЛЕКСА ПОЧВ ШИРОТНОГО ТРАНСЕКТА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

***Борис Максимович Клёнов***

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, тел. (913)956-19-88, e-mail: kbm1825@ngs.ru

***Михаил Владимирович Якутин***

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, тел. (383)363-90-25, e-mail: yakutin@issa.nsc.ru; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, профессор кафедры экологии и природопользования

Показана роль емкости катионного обмена (ЕКО) почвы в целом и её органического комплекса в основных типах автоморфных почв так называемого широтного трансекта Западной Сибири. Изучены целинные дерново-подзолистые почвы южной тайги, серая лесная почва северной лесостепи, выщелоченный и обыкновенный черноземы центральной лесостепи, а также темно-каштановая почва степи. Установлено, что в данном ряду ЕКО в почвах и гумусовой части изменяется с севера на юг по такой же закономерности, как и накопление гумуса. В частности, наивысшими значениями ЕКО характеризуются черноземы, где имеет место наиболее интенсивное гумусообразование. Делается заключение, что в основном в почвах трансекта ЕКО представлена в органической части.

**Ключевые слова:** почва, широтный ряд, емкость катионного обмена (ЕКО), ЕКО минерального комплекса, ЕКО органического комплекса, гуминовые кислоты, фульвокислоты.

## **CATION EXCHANGE CAPACITY OF HUMUS COMPLEX IN THE SOIL LATITUDINAL TRANSECT IN WESTERN SIBERIA**

***Boris M. Klenov***

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Senior Researcher, phone: (913)956-19-88, e-mail: kbm1825@ngs.ru

***Mikhail V. Yakutin***

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Associate Professor, Leading Researcher, Biogeocenology Laboratory, phone: (383)363-90-25, e-mail: yakutin@issa.nsc.ru; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor of Department of Ecology and Wildlife Management

The role of the cation exchange capacity (CEC) of the soil as a whole and its organic complex was shown at the example of the main automorphic soil types of so called West Siberian latitudinal transect. The soil types were studied as follows soddy podzolic in southern taiga, grey forest in northern forest steppe, leached and ordinary chernozem in central forest steppe as well as dark chestnut soil in steppe. CEC value in soil sequence in question was shown to change in the direction from north to south in the same consistency to natural laws as humus accumulation. Specifi-

cally, the highest CEC values are characteristic of chernozems where the most intensive humus formation takes place. It is concluded that mainly in the soils of the transect ECO is represented in the organic part.

**Key words:** soil, cation exchange capacity (CEC), CEC of mineral complex, CEC of organic complex humic acids, fulvic acids.

### *Введение*

Емкость катионного обмена (ЕКО) – один из основных и необходимых физико-химических показателей, характеризующих почвенно-поглощающий комплекс и почву в целом. Как известно из классических работ [1, 2], емкость катионного обмена почв (ЕКО почв) определяют две составляющих: органическая и минеральная. Следовательно, ЕКО зависит от варьирования свойств органического вещества и минеральной почвенной основы. От состояния этих составляющих зависит и общая величина ЕКО.

Показатель ЕКО имеет более или менее определенную величину для каждого типа почв. И эта величина в большинстве случаев зависит от содержания в почве органического вещества, в частности, гумусовых кислот [1–4]. В любом случае при характеристике почв обязательно указание общего показателя ЕКО. Вместе с тем известно, что при одинаковом или близком минералогическом составе минеральной части почвенной основы ЕКО возрастает с увеличением содержания гумуса в почве [1]. В целинных черноземах, например, гумусовые кислоты обеспечивают до 70 % поглощательной способности почв. Следует полагать, что ЕКО может в значительной степени зависеть не только от размеров накопления в почве органического вещества, но и его природы. А природа органического вещества, как известно, тесно связана с типом почвообразования и гумусообразования соответственно. В Западной Сибири и в Европейской части России, как ни в одной части земного шара, такая связь четко прослеживается на примере широтного зонального ряда почв от тундры до сухих степей [1, 5].

В данной работе показана роль ЕКО органической составляющей в основных типах целинных автоморфных почв, так называемого широтного трансекта Западной Сибири.

### *Методы и материалы*

Образцы были отобраны в дерново-подзолистых почвах южной тайги (Томская область), серой лесной почве северной лесостепи, черноземе выщелоченном и обыкновенном центральной лесостепи (Новосибирская область), а также в темно-каштановой почве степи (Алтайский край). В этих почвах ранее были определены состав гумуса и содержание карбоксильных групп в гуминовых кислотах (ГК) и фульвокислотах (ФК) [5–7]. В данном случае эти показатели оказались необходимыми для определения ЕКО гумусовых кислот расчетным путем. По результатам состава гумуса, в частности, по содержанию углерода ГК и ФК к весу почвы вычисляют массовую долю ГК и ФК в анализи-

руемой части образца, по которой рассчитывают их ЕКО, используя содержание карбоксильных групп в препаратах этих кислот, которое обычно выражают в мг-экв на 100 г сухого беззольного вещества. Общая величина ЕКО органического и минерального комплексов получена известным классическим методом Бобко-Аскинази [8].

Сравнительно давно был предложен химический метод отдельного определения ЕКО в органической и минеральной частях почвы, что дало возможность получить довольно убедительное представление об относительном участии органических и минеральных коллоидов в поглощении катионов почвами на примере зонального ряда почв от подзолистых до каштановых европейской части России [1]. До настоящего времени этот метод является, пожалуй, единственным удовлетворительным, хотя и трудоемким, но позволяющим полно оценить состояние ЕКО в почвах. С тех пор появилось много методов определения состава гумуса (содержание различных групп и фракций ГК и ФК) и содержания кислых функциональных групп в ГК и ФК, характеризующих ЕКО этих кислот. Нам представляется, что при изучении гумусового состояния почв характеристику ЕКО органической части почвы при наличии данных состава гумуса и ЕКО гумусовых препаратов целесообразно давать расчетным путем, ЕКО же минерального комплекса можно получить по разности между общей ЕКО и ЕКО органического комплекса.

### *Результаты*

Полученные расчетным путем данные для широтного трансекта почв Западной Сибири представлены в таблице.

Емкость катионного обмена в широтном ряду почв Западной Сибири

Почвы	Гумус, %	ЕКО орг., мг-экв/100 г вещества			ЕКО почвы, мг-экв/100 г	ЕКО орг., % от ЕКО почвы
		ГК	ФК	общая		
Дерново-сильнопodzолистая	2,1	2,3	3,5	5,8	14	39
Дерново-слабоподзолистая	4,5	4,6	4,7	9,3	22	42
Дерново-среднеподзолистая	3,8	4,6	4,5	9,1	20	45
Серая лесная	5,3	6,6	12,3	18,9	30	62
Чернозем выщелоченный	6,7	12,5	9,8	22,3	37	65
Чернозем обыкновенный	6,5	11,8	11,2	23,0	35	65
Темно-каштановая	2,4	4,5	5,4	9,9	17	55

Содержание гумуса в изученном ряду почв подтверждает общеизвестную закономерность – возрастание от дерново-подзолистых почв к черноземам и далее снижение в каштановых почвах. Эта закономерность проявляется более ярко, если рассматривать не содержание гумуса в наиболее гумусированном горизонте А, а запас его (обычно в т/га) в метровом слое почвы. Ранее было показано, что запас гумуса в метровой толще в почвах возрастает в направлении

с севера на юг и затем вновь постепенно убывает к обыкновенным и южным черноземам и еще большее его снижение наблюдается в каштановых почвах [6]. Таким образом, по запасам гумуса в почвах Западной Сибири проявляется та же закономерность, которая была установлена И. В. Тюриным [2] для почв европейской части России.

Основная часть гумуса в изученных почвах представлена группой гуминовых кислот и фульвокислот, содержание которых, особенно ГК, изменяется в данном ряду почв аналогично изменению содержания гумуса. Естественно, следовало бы ожидать, что в соответствии с этой закономерностью будет изменяться и ЕКО гумусовой части. Величины общей ЕКО гумусового комплекса действительно наглядно свидетельствуют об этом. Именно в целинных аналогах серой лесной почвы и черноземов, где сильнее всего и с наиболее интенсивным гумусообразованием в данном ряду выражена дерновая стадия развития почвообразования, прослеживаются наивысшие значения ЕКО (19–23 мг-экв/100 г вещества). Что касается ЕКО почвы в целом, т.е. ЕКО ее гумусового комплекса и минеральной основы, то в изученном ряду она показывает ту же закономерность, что и накопление гумуса. Как и накопление гумуса ЕКО зависит от интенсивности биологического круговорота и особенностей минералогического и механического состава почв.

### *Обсуждение*

Результаты проведенного исследования показали, что в большинстве типов изученных почв больше половины, и более 60 % в черноземах, представляющих собой основную часть земледельческого фонда Западной Сибири, ЕКО обусловлено органическим веществом. Такое заключение в определенной мере условно и основано на допущении постоянства или незначительного изменения общей ЕКО в незероированных почвах в зависимости от длительности использования их в пашне. Из этого следует, что любое ухудшение гумусового режима почвы будет вести к ослаблению ее ЕКО, и ослаблению экологических функций почвы в целом. Например, биологические и минерализационные потери гумуса из почвы вызывают сильное снижение ЕКО гумусовой составляющей. В некоторых наших работах показано, что под влиянием распашки и последующего длительного использования черноземов Приобья без систематического применения необходимых доз органических удобрений в течение 100 лет и более ЕКО гумусовой части может снизиться с 60 до 40 % от общей ЕКО почвы [9, 10]. Кроме того, под влиянием ненормированного орошения за счет возникающей ирригационной эрозии теряется гумус из почвенного профиля и, как следствие этого явления, идет снижение общей величины ЕКО. Существенные изменения ЕКО происходят, по-видимому, лишь при наличии эрозионных процессов, сопровождающихся потерей как органической, так и минеральной частей почв, а также при неудовлетворительном восполнении в почве органического вещества (малом количестве органических остатков или невнесении органических удобрений). Следует отметить, что эрозионные потери в старопа-

хотных черноземах Западной Сибири могут составлять не менее 50 % от общих потерь [11].

В последнее время в зарубежной литературе предпринимаются попытки проводить контрольные определения общей ЕКО почвы расчетным путем. Тенденция отменить некоторые длительные химико-аналитические процедуры вызывает одобрение, однако следует иметь в виду необыкновенную сложность почвы как природного объекта. В обзорной публикации [12] все включенные в расчетную формулу 1 параметры учитывают в составе ЕКО и органическую и минеральную основу.

$$\text{ЕКО} = 3,7 - 0,28 \text{ рН} + 2,6 \log_{10}(\text{C}_{\text{орг}}) + 0,28 (\% \text{ ила}). \quad (1)$$

Однако проведенные нами расчеты на примере с почвами Западной Сибири наводят на мысль, что выводы американских авторов скорее всего справедливы в пределах объекта их исследования. Это, видимо, действительно так, если принять во внимание, что илистая фракция по американской классификации представляет собой частицы размером менее 0,002 мм, а не 0,001 мм, как по российской классификации Н. А. Качинского.

### *Заключение*

Органический комплекс ЕКО в почвах широтного трансекта Западной Сибири изменяется согласно той же географической закономерности, что и накопление гумуса. Кроме того, в северной части трансекта, приуроченного к ареалу распространения почв подзолистого типа, в составе ЕКО почвы основную роль играет минеральный комплекс. В почвах же южной части трансекта большая часть ЕКО приходится на органический комплекс. Серые лесные почвы по составу ЕКО, видимо, все-таки занимают промежуточное положение.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Винокуров М. А. Емкость обмена минерального и органического комплексов // Почвоведение. – 1941. – № 5. – С. 32–44.
2. Тюрин И. В. Органическое вещество почв и его роль в плодородии. – М.: Наука, 1965. – 320 с.
3. Oorts K., Vanlauwe B., Merks R. Cation exchange capacities of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol with different organic matter inputs. Agriculture, Ecosystems and Environment. – 2003. – V. 100. – P. 161–171.
4. Martinez H. E., Fuentes E. J., Acevedo H. E. Carbono orgánico y propiedades del suelo // Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal. – 2008. – V. 8. – №.1. – P. 68–96.
5. Клёнов Б. М., Корсунова Т. М. Гумус некоторых типов почв Западной Сибири. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. – 158 с.
6. Клёнов Б. М. Гумус почв Западной Сибири. – М.: Наука, 1981. – 144 с.
7. Клёнов Б. М. Устойчивость гумуса автоморфных почв Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2000. – 176 с.
8. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. – 488 с.

9. Клёнов Б. М. Изменение ёмкости катионного обмена гумусовых кислот почв Западной Сибири под влиянием распашки // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 129–132.

10. Клёнов Б. М. Якутин М. В. Емкость катионного обмена и органическая составляющая выщелоченных черноземов Приобья // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 166–170.

11. Танасиенко А. А., Путилин А. Ф. Экологические аспекты проблемы эрозии почв // Сибирский экологический журнал. – 1994. – Т. 1, № 1. – С. 185–194.

12. Tranter G., Minasny B., McBratney A. B., Murphy B., McKenzie N. J., Grundy M., Brough D. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density // Soil Use and Management. – 2009. – V. 23. – P. 437–443.

## REFERENCES

1. Vinokurov M. A. (1941). The capacity of the exchange of mineral and organic systems. Eurasian soil science. 1941, № 5, 32–44. [in Russian].

2. Tyurin I. V. (1965). Organic matter of soil and its role in fertility. Moscow: Nauka press, 1965, 320 p. [in Russian].

3. Oorts K., Vanlauwe B., Merks R. Cation exchange capacities of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol with different organic matter inputs. Agriculture, Ecosystems and Environment 2003, 100, 161–171.

4. Martinez H. E., Fuentes E. J., Acevedo H. E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal, 2008, 8, 1, 68–96.

5. Klenov B. M., Korsunova, T. M. (1976). Humus of some soils of Western Siberia. Novosibirsk: Nauka press, Siberian Branch, 1976, 158 p. [in Russian].

6. Klenov B. M. (1981). Humus of soils of Western Siberia. Moscow: Nauka press, 1981. 144 p. [in Russian].

7. Klenov B. M. (2000). Humus sustainability of automorphic soils of Western Siberia. – Novosibirsk: Publishing house SB RAS, branch "GEO", 2000, 176 p. [in Russian].

8. Arinushkina E. V. (1970). Manual on chemical analysis of soils. Moscow University press, 1970, 488 p. [in Russian].

9. Klenov B. M. (2006). Change in the capacity of cationic exchange of humic acids in soils of Western Siberia under the influence of plowing. Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2006: International Scientific Conference: «Environmental monitoring, geoecology, remote sensing and photogrammetry». Vol. 3, Part 1 (pp. 129–132). Novosibirsk: SGGGA [in Russian].

10. Klenov B. M., Yakutin M. V. (2017). The cation exchange capacity and organic component of leached Chernozem Ob region. Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: «Environmental monitoring, geoecology, remote sensing and photogrammetry». Vol. 2 (pp. 166–170). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].

11. Tanasienko A. A., Putilin A. F. (1994). Environmental aspects of the problem of soil erosion // Siberian ecological journal, 1994, 1, 1, 185–194. [in Russian].

12. Tranter G., Minasny B., McBratney A. B., Murphy B., McKenzie N. J., Grundy M., Brough D. (2009). Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. Soil Use and Management, 2009, 23, 437–443.

© Б. М. Клёнов, М. В. Якутин, 2018

## **РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ТЕРРИТОРИИ УГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ «КАРАЖЫРА»**

### ***Камила Саниярбековна Исабекова***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, магистрант, e-mail: kamilka\_1995@mail.ru

### ***Серикбек Мухаметсадыкович Кудеринов***

Государственный университет им. Шакарима г. Семей, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А, ст. преподаватель кафедры геодезии и строительства, тел. (7222)35-84-38, e-mail: kuderinovs@mail.ru

### ***Еркебулан Ниязбекович Сембаев***

Государственный университет им. Шакарима г. Семей, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А, студент, тел. (7222)35-84-38, e-mail: sembaeverkebulan@mail.ru

### ***Назира Адамбековна Кудеринова***

Государственный университет им. Шакарима г. Семей, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А, кандидат технических наук, зав. кафедрой геодезии и строительства, тел. (7222)35-84-38, e-mail: kudnazira@mail.ru

### ***Гулизат Багдатовна Оразбекова***

Государственный университет им. Шакарима г. Семей, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А, ст. преподаватель кафедры геодезии и строительства, тел. (7222)35-84-38, e-mail: orazbekova@bk.ru

### ***Гульнур Саркытбековна Сейтказина***

Государственный университет им. Шакарима г. Семей, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А, ст. преподаватель кафедры геодезии и строительства, тел. (7222)35-84-38, e-mail: s\_gulnura\_s@mail.ru

В работе описана программа радиоэкологического мониторинга участка ведения работ. Изложены методы отбора проб, характеристики пунктов отбора проб, основы гамма-спектрометрического метода. Приведены результаты радиоэкологических исследований данной территории.

**Ключевые слова:** радиоэкологический мониторинг, дозиметрический контроль, гамма-спектрометрический анализ.

## **RADIOECOLOGICAL MONITORING OF THE ENVIRONMENT IN THE TERRITORY OF «KARAZHYRA» COAL FIELD**

### ***Kamila S. Isabekova***

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, e-mail: kamilka\_1995@mail.ru

### ***Serikbek M. Kuderinov***

Semey State University named after Shakarim, 20A, Glinka St., Semey, 071412, Republic Kazakhstan, Senior Lecturer, Department of Geodesy and Construction, phone: (7222)35-84-38, e-mail: kuderinovs@mail.ru

***Erkebulan N. Sembaev***

Semey State University named after Shakarim, 20A, Glinka St., Semey, 071412, Republic Kazakhstan, Student, phone: (7222)35-84-38, e-mail: sembaeverkebulan@mail.ru

***Nazira A. Kuderinova***

Semey State University named after Shakarim, 20A, Glinka St., Semey, 071412, Republic Kazakhstan, Ph. D., Head of Department of Geodesy and Construction, phone: (7222)35-84-38, e-mail: kudnazira@mail.ru

***Gulizat B. Orazbekova***

Semey State University named after Shakarim, 20A, Glinka St., Semey, 071412, Republic Kazakhstan, Senior Lecturer, Department of Geodesy and Construction, phone: (7222)35-84-38, e-mail: orazbekova@bk.ru

***Gulnura S. Seitkazina***

Semey State University named after Shakarim, 20A, Glinka St., Semey, 071412, Republic Kazakhstan, Senior Lecturer, Department of Geodesy and Construction, phone: (7222)35-84-38, e-mail: s\_gulnura\_s@mail.ru

This article describes the program for radioecological monitoring of the site of work. Methods of sampling, characteristics of sampling points, basis of the gamma spectrometric method are described. The results of radioecological researches of the territory are given.

**Key words:** radioecological monitoring, dosimetric control, gamma-spectrometric analysis.

Радиоэкологический мониторинг – комплексная информационно-техническая система наблюдений, исследований, оценивания и прогнозирования радиационного состояния биосферы, территорий, пострадавших от радиационных аварий.

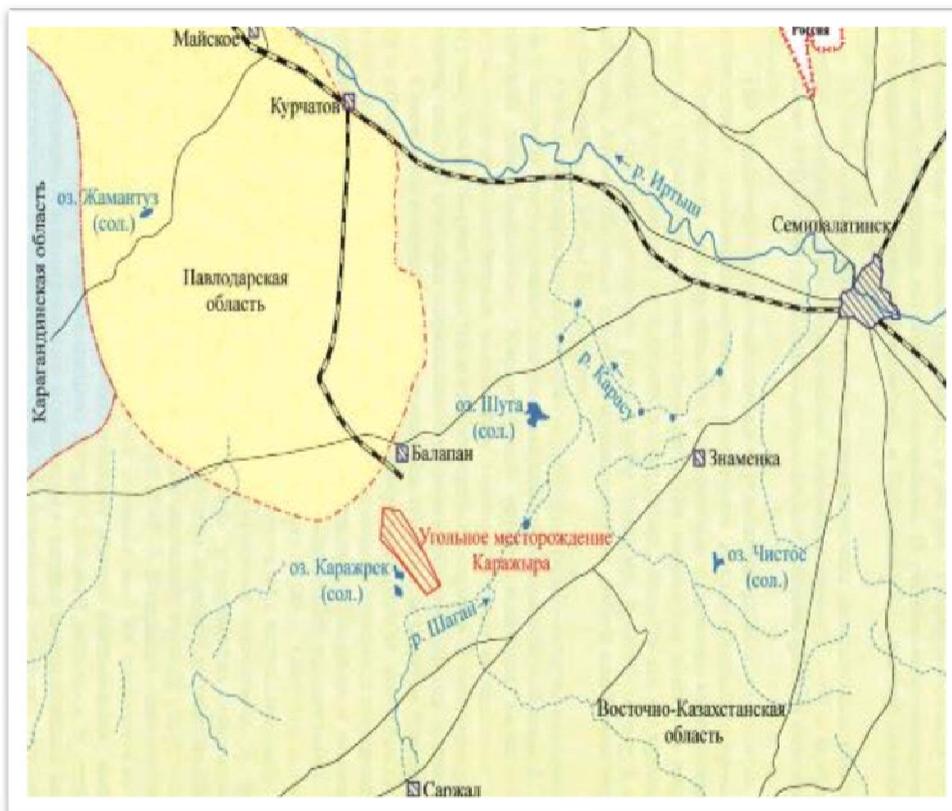
Основной целью системы мониторинга является получение достоверной информации о радиологическом состоянии в зоне производственного объекта для информационной поддержки принятия управленческих решений.

Месторождение «Каражыра» – основной источник высококачественной угольной продукции Казахстана, был открыт в 1967 году на территории бывшего Семипалатинского ядерного полигона (рисунок). Месторождение «Каражыра» расположено в 130 км к юго-западу от г. Семипалатинска Восточно-Казахстанской области. Площадь месторождения составляет 21,4 км<sup>2</sup>. Рельеф участка представлен мелкосопочником в юго-западной и западной части, широкой долиной пересекающей участок с юга на север и переходящей восточнее через короткий (300–400 м) слабопокатый уступ в обширную слабоволнистую равнину. Имеет место рельеф, образованный техногенным воздействием человека в виде отвалов вскрышных пород и карьерных выемок.

Условия полигона, условия ведения горных работ и близость скважин, в которых проводились подрывы ядерных зарядов, требуют обеспечения радиоэкологического контроля угольного месторождения «Каражыра».

Основные виды деятельности на угольном месторождении «Каражыра» – проведение горных и геологоразведочных работ, добыча угля, реализация полезных ископаемых, проектирование, строительство, реконструкция объектов

и другие. Продукция месторождения – уголь, который используется для бытовых нужд и в промышленности.



Карта района работ. Масштаб 1:1 000 000

Основной целью радиоэкологических работ на месторождении является оценка современного состояния радиационной обстановки на угольном месторождении «Каражыра» для обеспечения радиационной безопасности людей, осуществляющих деятельность на территории месторождения.

Объектами исследования являются территория участка, вовлекаемого в разработку, территория вскрышных пород первого и второго уступов, места временного и постоянного пребывания персонала.

Для получения информации о радиационном состоянии компонентов окружающей среды проводились мониторинговые наблюдения на основе натуральных инструментальных замеров.

### ***Методика проведения работ***

К методике проведения работ относятся:

- дозиметрический контроль персонала;
- полевые работы, к которым относятся радиометрические измерения, проведение полевой гамма-спектрометрической съемки на участках территории

месторождения, отбор проб воздушных аэрозолей, подземных и дренажных вод, выборочный радиационный контроль техники и оборудования;

- лабораторные исследования.

Индивидуальный дозиметрический контроль осуществлялся для некоторых работников угольного разреза. Каждому из них выдавался термолюминисцентный дозиметр, который крепился на одежду. Примерно 1 раз в 3 месяца дозиметр менялся на новый, а старый отправлялся в специализированную лабораторию для снятия показаний. Результатом работ являлось определение средней дозы внешнего облучения дозиметра за период его использования работником.

Измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма излучения при обследовании участков отборов проб и мест временного и постоянного пребывания персонала производились методом съемки на высоте 1 м от поверхности земли. Время измерения в точке контроля не менее 5 секунд, количество измерений не менее 5 раз.

Полевая спектрометрическая съемка осуществлялась портативным гамма-спектрометром, устанавливаемом в точках измерения.

Отбор проб почвы и горных пород производился методом «укола». Глубина пробоотбора составляла 10 см, площадь – 100 см<sup>2</sup>. Отбор проб угля производился из различных блоков месторождения. При этом выбирались места, где уголь не подвергался длительному атмосферному воздействию, поскольку выпадающие осадки и ветер могут стать причиной перераспределения радионуклидов в слое угля.

## ***Результаты***

Результаты проведенных радиометрических измерений автодорог показывают, что МЭД изменяется в пределах от 0,063 мкЗв/час до 0,12 мкЗв/час при среднем значении 0,086 мкЗв/час, что даже несколько ниже фоновых значений МЭД, характерных для данной местности. Таким образом, радиоактивных загрязнений автодорог не выявлено и их использование не может нанести вреда здоровью работников.

Результаты гамма-спектрометрического анализа показывают, что при пешеходной съемке значимых значений радионуклида <sup>137</sup>Cs не обнаружено. Из природных радионуклидов определены <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th и <sup>226</sup>Ra. Их средние содержания находятся на уровне 154, 8,3 и 22,3 Бк/кг, соответственно (таблица). Таким образом, пешеходной гамма-спектрометрической съемкой представляющих опасность радионуклидных загрязнений не обнаружено.

Диапазон значений МЭД, измеренный на поверхности почвы, а также на рабочих местах персонала, находится в пределах 0,08–0,21 мкЗв/ч, при среднем значении около 0,12 мкЗв/ч. Таким образом, среднее значение мощности эквивалентной дозы обследованных участков практически совпадает со средним уровнем фоновых значений данной местности. Поэтому сверхнормативного облучения работников угольного месторождения за счет внешнего гамма-излучения нет.

## Результаты пешеходной гамма-спектрометрической съемки

№ точки измерений	Результаты замеров, Бк/кг			
	<sup>40</sup> K	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>137</sup> Cs
1	206	5,3	24,9	<1
2	155	8	<10	<1
3	136	7,3	23,1	<1
4	131	11,1	17,2	<1
5	101	<5	23,6	<1
6	222	6,6	18,9	<1
7	99	<5	22,2	<1
8	92	11,5	13,3	<1
9	134	5,3	<10	<1
10	228	10,3	26,3	<1
11	226	<5	27,2	<1
12	162	15,6	33,5	<1
13	143	<5	24,8	<1
14	139	9,2	21,3	<1
15	133	9,6	44,5	<1
16	109	14,8	29,2	<1
17	159	10,2	19,5	<1
18	212	12,1	30,5	<1
19	105	11,7	12,5	<1
20	186	<5	<10	<1
Среднее	154	8,3	22,3	<1

Результаты гамма-спектрометрического анализа показывают, что из техногенных радионуклидов в исследуемых пробах обнаружено незначительное количество <sup>137</sup>Cs. Среднее содержание <sup>137</sup>Cs в почве находится на уровне 3,5 Бк/кг, что не превышает фон глобальных выпадений, составляющих для данного радионуклида 30 Бк/кг (глубина отбора 0–5 см). Содержание этого радионуклида не превышает значения минимально значимой удельной активности. Кроме того, в соответствии с «Гигиеническими нормативами «Санитарно-эпидемиологических требований к обеспечению радиационной безопасности» (ГН СЭТ ОРБ), для материалов, используемых в дорожном строительстве вне населенных пунктов (III класс) должно выполняться соотношение:

$$A_{\text{эфф}} = A_{\text{Ra}} + 1,3A_{\text{Th}} + 0,09A_{\text{K}} < 1500 \text{ Бк/кг.}$$

По результатам, беря максимальные измеренные значения  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{226}\text{Ra}$  в пробах взятых на дорогах, мы имеем, что  $A_{\text{эфф}} = 78$  Бк/кг, что значительно ниже 1500 Бк/кг; т.е. материал, использованный для строительства автодорог, вполне пригоден для этих целей.

Таким образом, согласно ГН СЭТ ОРБ почва, грунты и горные породы в исследуемом регионе не представляют радиационной опасности, т.к. содержание техногенных и природных радионуклидов не превышает нормативных уровней – фона глобальных выпадений и минимально значимой удельной активности (МЗУА).

Средняя измеренная активность Радия-226 составляет 5,3 Бк/кг, Тория-232 – 12,7 Бк/кг. Поэтому средняя измеренная активность угля=0,0226 Бк/кг. Таким образом, уголь относится к 1 классу радиационной опасности, при котором не вводится никаких ограничений на использование угля в хозяйственной деятельности.

### *Заключение*

На основании проведенных исследований объектов окружающей среды проведены радиоэкологический мониторинг и радиационный контроль на территории угольного месторождения «Каражыра».

Установлено, что измеренные уровни МЭД, суммарной поверхностной бета-активности почвы находятся на уровне фоновых значений. Пешеходной гамма-спектрометрической съемкой не обнаружено радионуклидных загрязнений, представляющих опасность. Согласно ГН СЭТ ОРБ почва, грунты и горные породы в исследуемом регионе не представляют радиационной опасности, т.к. содержание техногенных и природных радионуклидов не превышает уровней фона глобальных выпадений и минимальной значимой удельной активности. Добываемый уголь и образующаяся из него зола не представляют опасности ни для работников предприятия, ни для населения, использующего этот уголь.

Полученные результаты показывают, что радиационные дозы определяются природным радиационным фоном. Кроме того, радиоактивного загрязнения техники и оборудования не выявлено и его использование не может нанести вреда здоровью работников.

Оценивая современное состояние радиационной обстановки, с целью контроля и сохранения равновесного состояния окружающей среды в районах проведения хозяйственных работ на территории угольного месторождения «Каражыра», необходимо ежегодно проводить радиоэкологический мониторинг.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Отчет по работе «Радиологический мониторинг и радиационный контроль на угольном разрезе Каражыра» за 2017 год - 44 с.
2. Отчет по работе «Радиологический мониторинг и радиационный контроль на угольном разрезе Каражыра» за 2016 год - 50 с

3. Гигиенические нормативы «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности», утв. приказом Министра национальной экономики РК от 27 февраля 2015 года № 155.

4. Коган Р. М. и др., Основы гамма-спектрометрии природных сред, М.; Энергоатомиздат, 1991.

5. Экологический кодекс РК от 9 января 2007 года № 212-III ЗРК.

6. Санитарные правила «Санитарно-эпидемиологические требования к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах, почвам и их безопасности, содержанию территорий городских и сельских населенных пунктов, условиям работы с источниками физических факторов, оказывающих воздействие на человека» (постановление Правительства Республики Казахстан от 25 января 2012 года № 168).

7. Санитарные правила «Санитарно-эпидемиологические требования к объектам угольной промышленности» (постановление Правительства РК от 25 января 2012 года № 167).

## REFERENCES

1. The report on work Radiologicheskiiy monitoring i radiatsionnyy kontrol na ugolnom razreze Karazhyra [Radiological monitoring and radiation monitoring on Karazhyra coal mine] for 2017 - 44 p [in Russian].

2. The report on work Radiologicheskiiy monitoring i radiatsionnyy kontrol na ugolnom razreze Karazhyra [Radiological monitoring and radiation monitoring on Karazhyra coal mine] for 2016 - 50 p [in Russian].

3. Hygienic standards Sanitarno-epidemiologicheskiye trebovaniya kobespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti [Sanitary and epidemiologic requirements to support of radiation safety], No. 155 approved by the order of the Minister of national economy of the Republic of Kazakhstan of February 27, 2015 [in Russian].

4. Kogan R. M. Osnovy gamma-spektrometrii prirodnykh sred [Fundamentals of gamma spectrometry of natural media] M.; Energoatomizdat, 1991. [in Russian].

5. Ecological Code of the Republic of Kazakhstan from January 9, 2007 No. 212-SH ZRK [in Russian].

6. Health regulations Sanitarno-epidemiologicheskiye trebovaniya k atmosfernomu vozdukhу v gorodskikh i sel'skikh naseleennykh punktakh, pochvam i ikh bezopasnosti, sodержaniyu territoriy gorodskikh i sel'skikh naseleennykh punktov, usloviyam raboty s istochnikami fizicheskikh faktorov, okazyvayushchikh vozdeystviye na cheloveka [Sanitary and epidemiologic requirements to atmospheric air in city and rural settlements, soils and their safety, the maintenance of the territories of city and rural settlements, working conditions with sources of the physical factors making impact on the person] (the resolution of the government of the Republic of Kazakhstan of January 25, 2012 No. 168) [in Russian].

7. Health regulations Sanitarno-epidemiologicheskiye trebovaniya k obyektam ugolnoy promyshlennosti [Sanitary and epidemiologic requirements to objects of the carbon industry] (resolution of the government of RK of January 25, 2012 No. 167) [in Russian].

© К. С. Исабекова, С. М. Кудеринов, Е. Н. Сембаев, Н. А. Кудеринова,  
Г. Б. Оразбекова, Г. С. Сейтказина, 2018

## МОНИТОРИНГ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОЖАРОВ В СОСНЯКАХ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

### *Галина Александровна Иванова*

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок 50/28, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории лесной пирологии, тел. (391)249-44-62, e-mail: gaivanova@ksc.krasn.ru

### *Андрей Валерьевич Иванов*

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнёва, 660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, 82, кандидат биологических наук, доцент кафедры лесоводства, тел. (391)249-54-29, e-mail: ivanovv53@yandex.ru

### *Сергей Викторович Жила*

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок 50/28, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории лесной пирологии, тел. (391)249-44-62, e-mail: getgan@mail.ru

### *Ирина Евгеньевна Фридрих*

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, 50/28, аспирант, тел. (391)249-44-62, e-mail: ifridrih@sfu-kras.ru

В связи с изменением климата и возрастанием частоты лесных пожаров актуальны исследования последствий лесных пожаров и послепожарных процессов восстановления лесов. Приведены результаты мониторинга воздействия лесных пожаров разной интенсивности на компоненты насаждения и послепожарную сукцессию. Особенно значительная постпирогенная трансформация всех компонентов насаждения выявлена после пожаров высокой интенсивности. Выявлена зависимость отпада деревьев в древостое и послепожарного накопления фитомассы от интенсивности пожара. После пожара происходит перераспределение фитомассы растительности в мортмассу, особенно резко выраженное после высокоинтенсивных пожаров. Надземная фитомасса сосняков не претерпела значительных изменений после низкоинтенсивных пожаров и достигла допожарного уровня за рассматриваемый послепожарный период. Лесовозобновление в сосняках удовлетворительное и происходит без смены породного состава.

**Ключевые слова:** лесной пожар, сосняки, фитомасса, послепожарная сукцессия.

## MONITORING OF FIRE EFFECTS ON PINE FORESTS OF CENTRAL SIBERIA

### *Galina A. Ivanova*

V. N. Sukachev Institute of Forestry SB RAS, 50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (391)249-44-62, e-mail: gaivanova@ksc.krasn.ru

### *Andrey V. Ivanov*

M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University of Science and Technology, 82, Prospect Mira St., Krasnoyarsk, 660049, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Forestry, phone: (391)249-54-29, e-mail: ivanovv53@yandex.ru

### *Sergey V. Zila*

V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS, 50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (391)249-44-62, e-mail: getgan@mail.ru

***Irina E. Fridrich***

V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS, 50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Ph. D. Student, phone: (391)249-44-62, e-mail: ifridrih@sfu-kras.ru

Due to the climate change and the increasing frequency of forest fires, studies of the consequences of forest fires and post-fire processes of forest restoration are relevant. The results of monitoring the effects of fires of different intensity on the pine forest components and post-fire succession are presented. Especially significant post-fire transformation of all components is identified after fires of high intensity. The trees mortality and post-fire accumulation of phytomass depend on the fire intensity. After the fire, there is decrease of phytomass vegetation and augmentation of the mortmass, highly evident after high-intensity fires. The aboveground phytomass did not undergo significant changes after low-intensity fires and reached the pre-fire level during the considered period. Post-fire reforestation in pine forests is satisfactory and occurs without change of species composition.

**Key words:** forest fires, pine forest, phytomass, post-fire succession.

### ***Введение***

В Сибири ежегодно возникают тысячи лесных пожаров, при этом площадь, пройденная пожарами, может в отдельные пожароопасные сезоны достигать несколько млн га. Лесные пожары являются экологическим фактором формирования растительности и среды ее обитания [5, 8]. Лесные пожары воздействуют на все компоненты насаждения, но в разной степени. Соответственно, и компоненты реагируют на пирогенное воздействие по-разному, и это зависит от многих факторов. Таких как вид и интенсивность пожара, погодных условий и условий местопроизрастания, прочих факторов [8, 12, 13, 15]. В связи с этим целью работы являлся мониторинг состояния основных компонентов сосняков Средней Сибири после воздействия пожаров разной интенсивности.

### ***Объекты и методы***

Исследования проводились в сосняках Красноярского края на Сымской равнине (60°38'с.ш., 89°41'в.д.) и в Нижнем Приангарье (58°35'с.ш., 98°55'в.д.) на 20 постоянных пробных площадях. Сосняки кустарничково-лишайниково-зеленомошного типа леса, разновозрастные, III–IV классов бонитета. В сосняках в 2000–2003 гг. были проведены эксперименты по моделированию лесных пожаров, представляющие собой контролируемые выжигания разной интенсивности [10, 11]. В течение 14 лет после пожаров проводился мониторинг за восстановлением растительности в пройденных пожарами сосняках с использованием общепринятых в лесоведении методов [6, 8, 2, 10].

### ***Результаты и обсуждение***

Основной отпад деревьев происходил в течение первых двух-трех лет после пожара высокой интенсивности и был более растянут по времени после

среднеинтенсивных и низкоинтенсивных пожаров. Установлена зависимость количества отпавших деревьев от интенсивности пожара (коэфф. корр 0,88). Так, количество отпавших деревьев достигало 90 % после высокоинтенсивных пожаров, и было незначительно после низкоинтенсивных (8–10 % от общего количества деревьев). Ранее авторами выявлена зависимость отпада деревьев от высоты нагара на стволах и заселенности их насекомыми [9].

Известно, что к наиболее выраженному индикатору послепожарных изменений относится растительность нижних ярусов, которая является динамичным компонентом лесных экосистем, чутко реагирующим на все изменения среды. Степень повреждения травяно-кустарничкового яруса при горении определяет его послепожарную структуру и видовой состав [3, 4].

После пожаров, независимо от их интенсивности, на всех пробных площадях в сосняках погиб или деградировал лишайниково-моховой покров. После среднеинтенсивных и низкоинтенсивных пожаров растительные микрогруппировки сохранились в допожарных границах, которые практически были уничтожены высокоинтенсивным пожаром. Восстановление травяно-кустарничкового яруса путем вегетативного размножения наблюдалось уже в первые годы после пожаров. Формированию растительных микрогруппировок со светолюбивыми видами растений способствовало разреживание древесного полога вследствие отмирания деревьев. Сформировавшаяся мозаичная структура травяно-кустарничкового яруса сосняков после пожара высокой интенсивности и через четырнадцать лет сохранилась.

Для южнотаежных сосняков кустарничково-лишайниково-зеленомошных характерно большее видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса, но меньшее мохово-лишайникового покрова по сравнению со среднетаежными сосняками. И хотя процесс восстановления напочвенной растительности после пожаров проходит одинаково в этих зонах, но большее видовое разнообразие сохраняется в южнотаежных сосняках.

Стимулирующее влияние пирогенного фактора на возобновительные процессы в лесу известно давно [1, 6, 7, 8, 14]. Это происходит за счет обогащения почвы микроэлементами при сгорании верхнего слоя подстилки, мхов, кустарничков и трав.

Послепожарное возобновление в сосняках также определяется интенсивностью горения и степенью пирогенной трансформации среды обитания и не зависит от лесорастительной зоны. Выявлена связь численности подроста с глубиной прогорания подстилки и интенсивностью горения (коэффициенты корреляции 0,77 и 0,82, соответственно). Наиболее успешно лесовозобновление происходит после высокоинтенсивных пожаров, где, вследствие сильного разреживания древесного полога, создаются благоприятные условия для появления и роста всходов. Возобновление происходит без смены пород, сосной с примесью кедра и пихты. Жизненное состояние хорошее. Таким образом, послепожарное лесовозобновление в исследуемых сосняках можно признать удовлетворительным.

Послепожарный мониторинг выявил изменение фитомассы компонентов сосняков. После пирогенного воздействия меняется количество и структура фитомассы не только напочвенного покрова (опад, подстилка, травяно-кустарниковый ярус), но и всей надземной фитомассы, включающей древостой и подрост. Послепожарное изменение фитомассы самосева и подроста приведено на рис. 1.

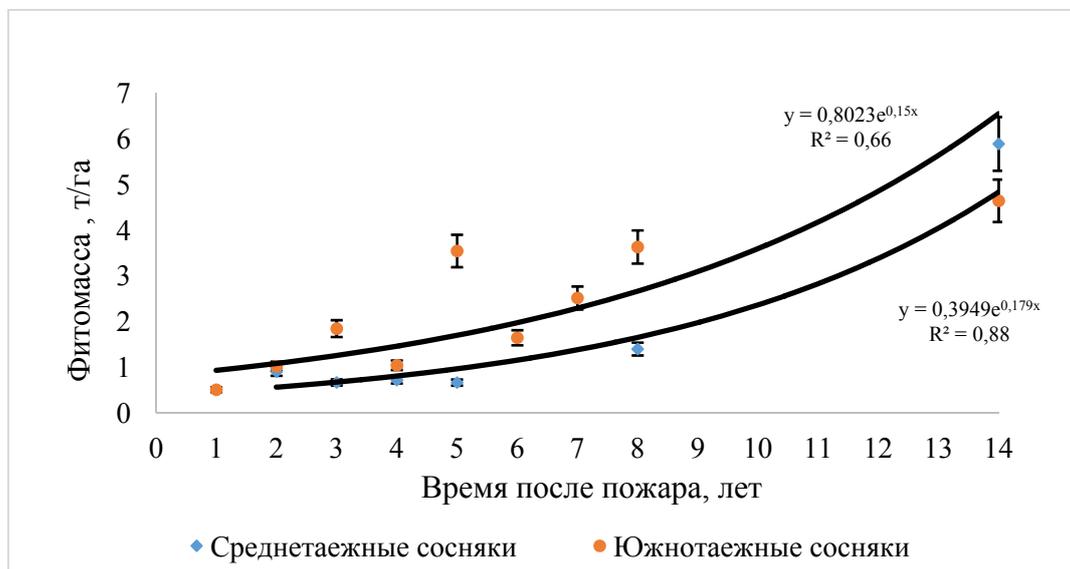


Рис. 1. Динамика фитомассы самосева и подроста после высокоинтенсивного пожара в сосняках

Постпирогенная структура и темпы накопления напочвенной фитомассы определяются интенсивностью пожара и давностью его воздействия. Процессы накопления схожи в южно- и среднетаежных сосняках и наиболее интенсивны в первые три года после пожара за счет отпада деревьев в древостое.

После пожаров происходит перераспределение фитомассы растительности в мортмассу, увеличение которой происходит за счет усыхания деревьев в древесном пологе и последующего разрушения. Наиболее значительные изменения структуры и количества надземной фитомассы после воздействия пожаров высокой интенсивности. Спустя 14 лет после пожара высокой интенсивности фитомасса живых деревьев в южнотаежном сосняке уменьшилась в 2 раза (рис. 2). Надземная фитомасса не претерпела значительных изменений после низкоинтенсивных пожаров и достигла допожарного уровня за рассматриваемый послепожарный период.

После пожаров наблюдается перераспределение фитомассы растительности в мортмассу, увеличение которой происходит за счет усыхания деревьев в древесном пологе и последующего разрушения. Наиболее значительны изменения структуры и количества надземной фитомассы после воздействия пожаров высокой интенсивности. Надземная фитомасса не претерпела значительных изменений после низкоинтенсивных пожаров и достигла допожарного уровня за рассматриваемый послепожарный период.



Рис. 2. Динамика количества и структуры надземной фитомассы в южнотаежном сосняке после высокоинтенсивного пожара

### Заключение

Проведение мониторинга после пожаров с известными параметрами позволило получить точные данные о трансформации компонентов сосняков после пожаров разной интенсивности.

Интенсивность горения определяет количество сгоревшей фитомассы при пожаре. Сгорание фитомассы, в свою очередь, влияет на послепожарные процессы, такие как отпад древостоя, направленность сукцессии и лесовозобновление независимо от зонально-экологических условий. Все эти процессы взаимосвязаны. Лесовозобновление в сосняках удовлетворительное и происходит без смены породного состава.

Лесные пожары также влияют на послепожарную трансформацию фитомассы, накопление которой определяется интенсивностью пожара, обуславливающей количество сгоревших лесных горючих материалов и степень повреждения компонентов насаждения. Происходит перераспределение фитомассы растительности в мортмассу, особенно резко выраженное после высокоинтенсивных пожаров.

В связи с изменением климата и возрастанием частоты лесных пожаров необходимы детальные исследования их последствий и послепожарных процессов восстановления лесов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безкорвайная И.Н., Иванова Г.А., Тарасов П.А., Сорокин Н.Д., Богородская А.В., Иванов В.А., Конард С.Г., Макрае Д.Д. Пирогенная трансформация почв сосняков средней тайги Красноярского края // Сибирский экологический журнал. - 2005. - №1. - С. 143–152.

2. Иванова Г.А., Иванов В.А., Ковалева Н.М., Конард С.Г., Жила С.В., Тарасов П.А. Сукцессия растительности после высокоинтенсивного пожара в сосняке лишайниковом // Сибирский экологический журнал.-2017.- № 1.- С. 61-71.
3. Иванова Г.А., Перевозникова В.Д., В.А. Иванов. Трансформация нижних ярусов лесной растительности после низовых пожаров // Лесоведение.- 2002.- №2.- С.30-35.
4. Ковалева Н.М., Иванова Г.А. Восстановление живого напочвенного покрова на начальной стадии пирогенной сукцессии // Сибирский экологический журнал. – 2013. – № 2. – С. 205-215.
5. Мелехов И.С. Влияние пожаров на лес. – М.-Л.: Гослестехиздат, 1948. – 126 с.
6. Побединский А. В. Сосновые леса Средней Сибири и Забайкалья. – М.: Наука, 1965. – 268 с.
7. Попова Э.П. Особенности почвообразования в лесных биогеоценозах Приангарья в зависимости от давности пожаров // Генезис и география лесных почв. - М.: Наука, 1980. - С. 40–52.
8. Санников С. Н. Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной. - М.: Наука, 1992. - 264 с.
9. Conard S.G., Tsvetkov P., Ivanova G.A., McRae D.J. Impacts of Fire Severity and Fire Behavior on Mortality of Pinus sylvestris in Pine Forests of Central Siberia // Climate Disturbance Interactions in Boreal Forest Ecosystems. IBFRA 12-th Annual Scientific Conference 3-6 May 2004, Fairbanks, Alaska, USA. Program and Abstracts. – 2004. - С. 54.
10. Kukavskaya E.A., Ivanova G.A., Conard S.G., McRae D.J., Ivanov V.A. Biomass dynamics of central Siberian Scots pine forests following surface fires of varying severity // Int. J. Wildland Fire. – 2014 –Vol.23(6). -С. 872-876. DOI: 10.1071/WF13043
11. McRae, D. J., Conard S.G., Ivanova G.A., Sukhinin A.I., Baker S.P., Samsonov Y.N., Blake T.W., Ivanov V.A., Ivanov A.V., Churkina T.V., Hao W.M., Koutzenogii K.P., Kovaleva N. Variability of Fire Behavior, Fire Effects and Emissions in Scotch Pine Forests of Central Siberia // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. – 2006. - Vol. 11(1). – С. 45-74.
12. Reinhardt E. D., Keane R. E., Brown J. K. Modeling fire effects // Int. J. Wildland Fire. - 2001. - Vol. 10 (3–4). - С. 373–380.
13. Ryan K. C., Reinhardt E. D. Predicting postfire mortality of seven western conifers // Can. J. For. Res. - 1988. - Vol. 18 (10). - С. 1291–1297.
14. Turner M. G., Hargrove W. W., Gardner R. H., Romme W. H. Effects of fire on landscape heterogeneity in Yellowstone National Park, Wyoming // J. Veget. Sci. - 1994. - Vol. 5 (5). - С. 731–742.
15. Wardle DA, Hornberg G, Zackrisson O, Kalela-Brunding M, Coomes DA Long-term effects of wildfire on ecosystem properties across an island area gradient // Science. – 2003. - № 300. – С. 972-975. doi:10.1126/SCIENCE.1082709

## REFERENCES

1. Bezkorovaynaya I.N., Ivanova G.A., Tarasov P.A., Sorokin N.D., Bogorodskaya A.V., Ivanov V.A., Conard S.G., McRae D.J. (2005). Pyrogenic transformation of Pine stand Soil in Middle Taiga of Krasnoyarsk region. Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal, №1, 143–152. [In Russian]
2. Ivanova G.A., Ivanov V.A., Kovaleva N.M., Conard S.G., Zhila S.V., Tarasov P.A. (2017). Succession of vegetation after high-intensity fire in a pine forest with lichens. Contemporary Problems of Ecology, Vol. 10. N.1, 52-61.
3. Ivanova G.A., Perevoznikova B.D., Ivanov V.A. (2002). Transformation of vegetation in lower forest stories after ground fires. Lesovedenie, №2, 30-35. [In Russian].
4. Kovaleva N.M., Ivanova G.A. (2013). Recovery of ground vegetation at the initial stage of fire succession // Contemporary Problems of Ecology, Vol. 6, N.2, 162-169.
5. Melechov I.S. (1948). Effect of fires on forest. M. - L.: Goslestechnisdat, 126 с. [In Russian].

6. Pobedinskii A.V. (1965). Pine forests of Middle Siberia and Zabaikalie. M.: Nauka, 268 c. [In Russian].
7. Popova EP. (1980). Soil formation peculiarities in forest biogeocenosis of Angara region depending on time since fire. In *Genesis and geography of forest soil*, M.: Nauka, 40–52 [In Russian].
8. Sannikov S.N. 1992. Ecology and geography of Scots pine natural regeneration. M.: Nauka, 264 c. [In Russian].
9. Conard S.G., Tsvetkov P.A., Ivanova G.A., McRae D.J. (2004). Impacts of Fire Severity and Fire Behavior on Mortality of *Pinus sylvestris* in Pine Forests of Central Siberia. *Climate Disturbance Interactions in Boreal Forest Ecosystems*. [IBFRA 12-th Annual Scientific Conference 3-6 May 2004, Fairbanks, Alaska, USA. Program and Abstracts], C. 54.
10. Kukavskaya E.A., Ivanova G.A., Conard S.G., McRae D.J., Ivanov V.A. (2014). Biomass dynamics of Central Siberian Scots pine forests following surface fires of varying severity. *Int. J. Wildland Fire*, 23(6), 872-876. DOI: 10.1071/WF13043.
11. McRae, D. J., Conard S.G., Ivanova G.A., Sukhinin A.I., Baker S.P., Samsonov Y.N., Blake T.W., Ivanov V.A., Ivanov A.V., Churkina T.V., Hao W.M., Koutzenogii K.P., Kovaleva N. (2006). Variability of fire behavior, fire effects and emissions in Scotch Pine forests of Central Siberia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global change*, Vol. 11 (1), 45-74.
12. Reinhardt E. D., Keane R. E., Brown J. K. (2001). Modeling fire effects. *Int. J. Wildland Fire*, Vol. 10 (3–4), 373–380.
13. Ryan K. C., Reinhardt E. D. (1988). Predicting postfire mortality of seven western conifers. *Can. J. For. Res.*, Vol. 18 (10), 1291–1297.
14. Turner M. G., Hargrove W. W., Gardner R. H., Romme W. H. (1994). Effects of fire on landscape heterogeneity in Yellowstone National Park, Wyoming. *J. Veget. Sci.*, Vol. 5 (5), 731–742.
15. Wardle DA, Hornberg G, Zackrisson O, Kalela-Brunding M, Coomes DA (2003) Long-term effects of wildfire on ecosystem properties across an island area gradient. *Science*, 300, 972-975. doi:10.1126/SCIENCE.1082709

© Г. А. Иванова, А. В. Иванов, С. В. Жила, И. Е. Фридрих, 2018

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ИССЛЕДОВАНИИ СТЕПЕЙ УЛУГ-ХЕМСКОЙ КОТЛОВИНЫ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА**

*Дмитрий Сергеевич Дубовик*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат географических наук, зав. кафедрой экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86, e-mail: d.d@ngs.ru

*Михаил Владимирович Якутин*

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоэкологии, тел. (383)363-90-25, e-mail: yakutin@issa.nsc.ru; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, профессор кафедры экологии и природопользования

В результате дешифрирования данных Landsat проведена оценка площадей пашни и залежей в центральной и юго-восточной частях Улуг-Хемской котловины Республики Тыва. Проведенное исследование продемонстрировало, что, несмотря на большое разнообразие локальных условий в пределах Улуг-Хемской котловины, определяющим фактором для пахотного земледелия является климатический. В зоне сухих степей наиболее перспективным типом хозяйственного использования территорий, занятых степной растительностью, является отгонное скотоводство. Значительная часть территорий, распаханых во второй половине XX века, в условиях рыночной экономики забрасывается, переводится в разряд залежей и в дальнейшем начинает вновь использоваться в качестве пастбищ. Представляется актуальным более подробное исследование и дальнейший мониторинг степных экосистем Улуг-Хемской котловины.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, экологический мониторинг, степные экосистемы, пашня, залежь, деградация.

## **USE OF REMOTE SENSING DATA IN THE STUDY OF THE STEPPES OF ULUG-CHEM DEPRESSION IN THE TUVA REPUBLIC**

*Dmitry S. Dubovik*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, PhD, Associate Professor, Department of Ecology and Environmental Management, tel. (383)361-08-86, e-mail: d.d@ngs.ru

*Mikhail V. Yakutin*

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Associate Professor, Leading Researcher, Biogeocenology Laboratory, phone: (383)363-90-25, e-mail: yakutin@issa.nsc.ru; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor of Department of Ecology and Wildlife Management

As a result of Landsat data decoding, the area of arable land and deposit lands in the Central and South-Eastern parts of the Ulug-Khem depression in the Tuva Republic was assessed. The study showed that, despite the wide variety of local conditions within the Ulug-Khem depression,

the determining factor for arable farming is climate. In the dry steppe zone the most perspective type of economic use of the territories occupied by steppe vegetation is the distant cattle breeding. A significant part of the territories plowed in the second half of the twentieth century, in a market economy is abandoned, transferred to the category of deposits and later is reused as pastures. A more detailed study and further monitoring of steppe ecosystems of Ulug-Khem depression is considered relevant.

**Key words:** remote sensing, environmental monitoring, steppe ecosystems, arable land, deposit land, degradation.

### *Введение*

Методы изучения Земли из космоса относят к высоким технологиям, что определяется не только использованием спутниковой техники, сложных оптико-электронных приборов и компьютеров, но и новых подходов к получению и интерпретации результатов измерений. Трудоемкие исследования проводятся на небольшой площади, но дают возможность обобщать данные на большие пространства и даже на весь земной шар. Широта охвата и сравнительно короткие интервалы времени для получения результатов являются характерными чертами спутниковых методов исследования Земли. Данные дистанционного зондирования можно использовать в различных сферах деятельности. Информация, полученная с использованием этих методов, поступает к пользователю оперативно, и зачастую не может быть собрана в полевых условиях. Методы дистанционного зондирования постоянно модифицируются, и это позволяет получать более точную и разнообразную информацию об объекте [1, 2].

Территория исследуемого региона находится в центральной части Азиатского материка между 54 и 50° с. ш., 88 и 89° в. д., и является преимущественно горной страной (почти 82 % территории занято горами). Только 18 % территории приходится на долю относительно пониженных и выровненных элементов рельефа [3]. На территории Тувы выделяются следующие типы ландшафтов: котловинный сухостепной, горностепной, горнолесной и высокогорный. Типичные черты сезонной дифференциации определяются положением Тувы во внутриконтинентальном секторе умеренного пояса. Изолированность котловин служит одной из причин формирования в них климата повышенной континентальности. Территория лежит в «дождевой тени» хребтов Алтая и Западного Саяна, поэтому осадков выпадает мало – 180–300 мм. Наибольшее количество осадков – до 65–85 % годовой суммы – приходится, главным образом, на июль и август. В зимний период в условиях отрицательного радиационного баланса и господства антициклонической погоды днища котловин сильно выхолаживаются, а в средне- и высокогорных районах, в результате инверсионных потоков, температура воздуха на 15–20° выше, чем в котловине. В летний сезон, наоборот, происходит сильное нагревание днища котловины при более пониженных температурах в горных районах [4].

Центрально-Тувинская котловина представляет собой понижение рельефа между горами Западного Саяна, Восточного Саяна, Алтая и Танну-Ола на тер-

ритории республики Тува. Длина Центрально-Тувинской котловины около 400 км, ширина от 25 до 70 км, высота колеблется от 600 до 900 м над уровнем моря. Местами в котловину вдаются отроги соседних хребтов. Котловину пересекает долина Верхнего Енисея (Улуг-Хема). Территорию котловины принято разделять на западную и восточную части – Хемчикскую и Улуг-Хемскую котловины, соответственно. Улуг-Хемская котловина занимает большую часть Центрально-Тувинской депрессии. Длина ее составляет около 100 км, при средней ширине 25–30 км. В северной и западной частях котловины наблюдается низкогорный, сильно расчлененный рельеф отдельных возвышенностей с высотами 1200–1500 м и мелкосопочник правого и левого бережья р. Улуг-Хем. За пределами долины р. Улуг-Хема, в области распространения увалисто-грядово-равнинного рельефа, наблюдаются древние сухие долины и небольшие бессточные котловины с солоноватыми и солеными озерами. На некоторых водораздельных увалах и в древних долинах встречаются крупные песчаные массивы [5, 6].

Территория Улуг-Хемской котловины представляет собой природный комплекс, состоящий из равнинных и горных экосистем, экосистем речных долин и т. д. Рельеф изобилует разнообразием форм, что является результатом разнообразных природных условий в котловине. Для юго-восточной и восточной частей котловины характерны горный рельеф и повышенное увлажнение, что приводит к преобладанию горных черноземов и темно-каштановых почв. Данные почвы являются наиболее благоприятными для ведения сельского хозяйства. В понижении котловины преобладают светло-каштановые и темно-каштановые песчаные почвы. В западной части котловины каштановые и темно-каштановые песчаные и супесчаные в сочетании с солончаками, что объясняется наличием речных долин [3, 7].

Сухостепные межгорные котловины Тувы в сочетании с горным обрамлением исторически являются центрами развития кочевого скотоводства. Использование пастбищных ресурсов котловин и горных склонов – основной фактор исторической и современной антропогенной трансформации экосистем. Различные условия внутри котловины, а также отгонная пространственно-временная система выпаса скота позволяет содержать скот на естественном корме круглый год. Это уменьшает антропогенную нагрузку на пастбища, давая восстановиться экосистемам [8].

Начиная с 60-х годов прошлого века в Туве ведется активная распашка территорий котловин, в том числе и Улуг-Хемской. Это привело к сокращению площадей пастбищ, что, в свою очередь, привело к уменьшению поголовья скота. Антропогенная нагрузка на территорию резко увеличилась, поскольку к тому времени не существовало технологий природопользования именно для такой специфической территории. Значительное по площади количество пашен через 10–15 лет постепенно вышло из севооборота, что привело к увеличению площадей залежей. По сравнению с началом 90-х годов прошлого века площадь пашен в Улуг-Хемской котловине сократилась в примерно в 7 раз, что говорит

о том, что большая часть из них попросту стала непригодна для посева. В настоящее время большая часть земель Тувы отнесена к категории земель лесного фонда (64,5 %), к землям сельскохозяйственного назначения относится 18,8 % площади территории республики [6, 9, 10].

Крайняя «ранимость» степных экосистем, в условиях резко континентального климата и увеличивающейся антропогенной нагрузки подчеркивает важность вопросов изучения, оперативной оценки хозяйственного использования, планирования, рационального управления этой территорией. Дистанционные методы зондирования земли в Туве используются пока очень ограниченно [11–13]. Более широкое их использование могло бы быть очень полезным в сохранении стабильной экологической обстановки в регионе.

### *Объекты и методы исследования*

Улуг-Хемскую котловину можно условно разделить на три части, заметно отличающиеся между собой по природным условиям: западную, центральную и юго-восточную. В качестве непосредственного объекта исследования был выбран участок, ограниченный реками Улуг-Хем, Каа-Хем и Элегест с севера и запада, и границей котловины с востока и юга. Именно здесь проживает подавляющая часть населения республики, сосредоточены запасы угля, располагаются многие ценные природные объекты. Данный участок охватывает всю юго-восточную и большую половину центральной части котловины и включает контрастный набор экосистем – от сухих степей на светло-каштановых почвах и массивов незакрепленных песков в центральной части котловины, до степей на черноземных почвах, лесостепных и лесных экосистем в юго-восточной части. Исследуемая территория представлена на рис. 1.

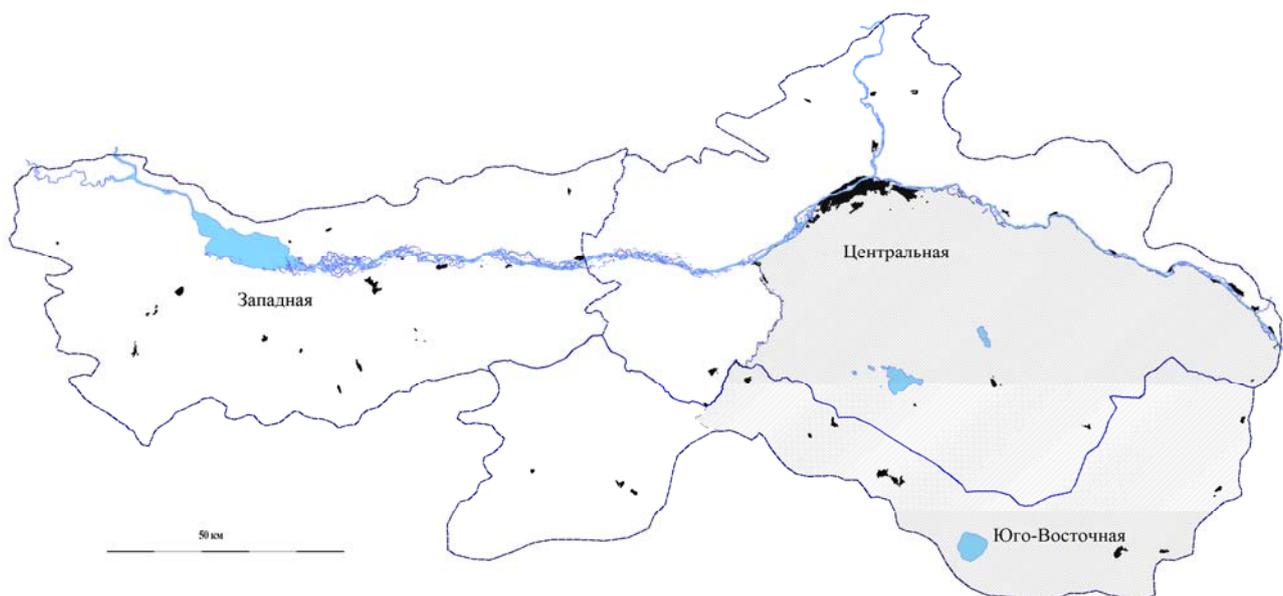


Рис. 1. Исследуемая территория в Улуг-Хемской котловине

В качестве исходных материалов для оценки территории, помимо литературных данных, были использованы данные Landsat 5, 7, 8 [14], Почвенная карта республики Тува масштаба 1:1 000 000 [15], топографические карты масштаба 1: 200 000 [16]. Кроме того, отдельные объекты были получены в обменном векторном формате. Характеристика используемых пространственных данных представлена в табл. 1.

*Таблица 1*

Данные Landsat, используемые в работе

Наименование	Дата съемки	Масштаб (разрешение)
Landsat 5 L51IKR1011262040100_HDF Синтезированные изображения в комбинациях каналов RGB 1234657 Растительный индекс NDVI	19.09. 2011 г.	200 000 (30 м)  (30 м)
Landsat 7 LE71400242013291SG100 Синтезированные изображения в комбинациях каналов RGB 1234657 Растительный индекс NDVI	18.10. 2013 г.	200 000 (15 м)  (30 м)
Landsat 8 LC81400242013203LGN00: Синтезированные изображения в комбинациях каналов RGB 769; 764; 654 Растительный индекс NDVI	22.07. 2013 г.	200 000 (15 м)  (30 м)

Для работы были выбраны снимки соответствующих сезонов с приемлемым облачным покрытием. Основной снимок второй половины лета 2013 года, а также снимок Landsat 7, полученный в октябре и Landsat 5, предыдущего сезона – для более достоверной дифференциации используемых пашен и залежей.

Все данные были получены в виде отдельных спектральных каналов, представляющих из себя заархивированный набор черно-белых растровых изображений в формате geo-tiff. Данные скорректированы спектрально и пространственно, поставляются в универсальной поперечной проекции Меркатора на эллипсоид WGS-84. Обработка снимков осуществлялась с использованием программного продукта Erdas Imagine 2013 и включала в себя синтезирование цветных изображений, построение растительных индексов, увеличение пространственного разрешения цветных изображений за счёт панхроматического канала (операция «Resolution merge», метод «Brovey transform»).

После того, как данные были подготовлены, дальнейшая работа осуществлялась в двух геоинформационных системах – Mapinfo Professional и «Карта 2008». Дешифрирование, векторизация, построения матриц осуществлялись в ГИС «Карта 2008», здесь же происходила вся совместная работа с различными растровыми источниками, качественный, и, частично, количественный анализ территории. В Mapinfo Professional удобнее было осуществлять построение

отдельных объектов, проводить вычисления площадей. Связь между средами осуществлялась через обменный формат «.tif». Весь указанный комплекс данных, собранный в виде электронной карты в программной среде «ГИС Карта» по существу и составил пространственную основу для исследования и оценки территории.

### ***Результаты***

Одна из задач работы заключалась в установлении площадей и расположения фактически используемых пашен и деградированных участков залежей в пределах исследуемой территории. Дешифрирование выполнялось с учетом всех имеющихся пространственных данных: два «вспомогательных» снимка – Landsat 7, полученный в октябре 2013 года и Landsat 5, полученный в аналогичном сезоне 2011 года использовались при дифференциации используемых пашен и залежей; данные растительного индекса NDVI – для выявления участков с нарушенным растительным покровом. Кроме того, границы между различными экосистемами лучше отображаются на изображениях, синтезированных в различных сочетаниях спектральных каналов.

Пашни и залежи имеют формы, несвойственные природным объектам, чаще всего прямоугольные или угловатые. Земли, используемые под пашни, на снимке имеют равномерную, светлую текстуру, что объясняется отражательной способностью культур, которые там произрастают (рис. 2). Неиспользуемые земли, залежи и пары на снимке выглядят темнее, что является следствием за-растания их рудеральной растительностью.



Рис. 2. Пашни и залежи в Улуг-Хемской котловине на космическом снимке

На залежах и пашнях в основном в центральной части котловины присутствуют участки, поверхности которых полностью покрыты песком и щебнем. На снимке, в сочетании каналов RGB 769 такие участки выглядят белесыми «островками» (рис. 3).

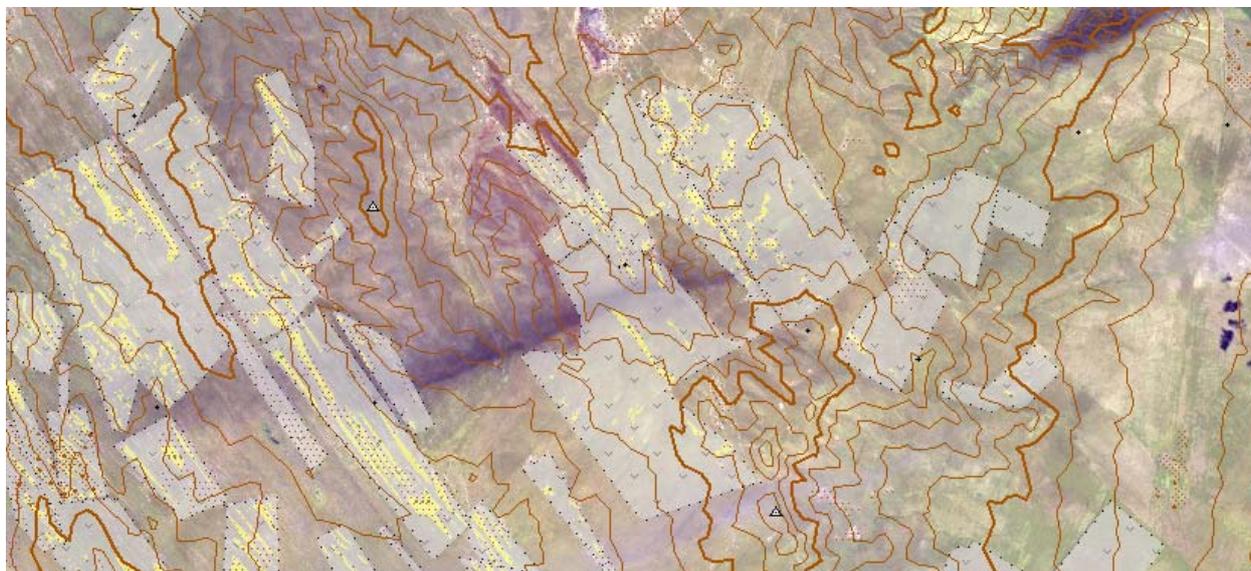


Рис. 3. Выходы песка и щебня (желтые островки) на залежах в центральной части Улуг-Хемской котловины, на фоне снимка Landsat 8

### *Обсуждение*

Распределение площадей выделов преобладающих типов хозяйственного использования территорий в пределах исследуемого участка Улуг-Хемской котловины представлено в табл. 2.

*Таблица 2*

Исторически сложившиеся типы хозяйственного использования степных экосистем Улуг-Хемской котловины, км<sup>2</sup>

Наименование	Центральная часть котловины	Юго-восточная часть котловины
Трудно доступные, либо мало используемые территории	539	1008
Целинные территории используемые, преимущественно, в качестве пастбищ	2154	669
Территории, периодически используемые в качестве пашен	0	196
Территории, занятые преимущественно залежами	1640	714
Селитебные и промышленные территории	77	14

В результате комплексного дешифрирования и анализа территории по данным 2013 года было установлено, что площади используемой пашни в пределах исследуемой территории в юго-восточной части котловины составляют 60,2 км<sup>2</sup>, тогда как в центральной части пашни сведены полностью. Площадь залежных земель в юго-восточной части составляет 257,75 км<sup>2</sup>; на территории центральной части котловины площадь залежей составляет 882,39 км<sup>2</sup>, что почти в три раза больше, чем в юго-восточной. Залежи, находящиеся в центральной части котловины более подвержены эрозионным процессам, чем залежи в юго-восточной части. Об этом говорит соотношение площадей деградированных или полностью сведенных участков на залежах.

В юго-восточной части котловины среднее расстояние от населенных пунктов до залежных участков составляет около 12 км, тогда как пашни имеющиеся только в этой части котловины расположены от населенных пунктов в среднем на расстоянии 2 км, что меньше расстояний от залежей до населенных пунктов в 6 раз. При этом прочих существенных отличий в расположении пашен и залежей в юго-восточной части котловины не обнаружено. Очевидно, что в 90-е гг. XX века расстояние от населенного пункта было ведущим критерием при выборе участков, переводимых в режим залежи. В центральной части котловины участки, занятые пашнями не были обнаружены, т.е. все ранее распаханые территории переведены в разряд залежей.

### *Заключение*

Проведенное исследование продемонстрировало, что, несмотря на большое разнообразие локальных условий в пределах Улуг-Хемской котловины, определяющим фактором для пахотного земледелия является климатический. В зоне сухих степей наиболее перспективным типом хозяйственного использования территорий, занятых степной растительностью, является отгонное скотоводство. Значительная часть территорий, распаханых во второй половине XX века, в условиях рыночной экономики забрасывается, переводится в разряд залежей и в дальнейшем начинает вновь использоваться в качестве пастбищ. Представляется актуальным более подробное исследование и дальнейший мониторинг степных экосистем Улуг-Хемской котловины.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. – М.: Логос, 2001. – 264 с.
2. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
3. Носин В. А. Почвы Тувы. – М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1963. – 340 с.
4. Чибилёв А. А. Степи Северной Евразии (эколого-географический очерк и библиография). – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 192 с.
5. Геология СССР. Т. 29. Тувинская АССР. Ч. 1. Геологическое описание [под ред. А. В. Сидоренко]. – М.: Недра, 1966. – 464 с.

6. Ондар С. О., Путинцев Н. И., Ашак-оол А. Ч. и др. Проблемы устойчивости экосистем и оценка их современного состояния. – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2000. – 182 с.
7. Ступин В. П. Картографирование морфосистем. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. – 148 с.
8. Куминова А. В., Седельников В. П., Маскаев Ю. М. и др. Растительный покров и естественные кормовые угодья Тувинской АССР. – Новосибирск: Наука, 1985. – 185 с.
9. Гомбоев Б. О. Аграрное землепользование Внутренней Азии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 228 с.
10. Мордкович В. Г., Гиляров А. М., Тишков А. А., Баландин С. А. Судьба степей. – Новосибирск: «Мангазeya», 1997. – 208 с.
11. Якутин М. В., Дубовик Д. С. Использование данных дистанционного зондирования в мониторинге экосистем Турано-Уюкской котловины // Геодезия и картография. Известия высших учебных заведений. – 2012. – № 1. – С. 75–78.
12. Якутин М. В., Дубовик Д. С. О системе показателей мониторинга экосистем сухих степей // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 2 (18). – С. 94–99.
13. Якутин М. В., Дубовик Д. С., Анопченко Л. Ю. Оценка динамики водного зеркала малых озер Убсунурской котловины (Тыва) по материалам дистанционного зондирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 1. – С. 71–74.
14. Официальный сайт геологической службы США. – Режим доступа: <http://glovis.usgs.gov> (19.03.14 г.)
15. Почвенная карта республики Тува. Масштаб 1:1 000 000. – 1969.
16. Топографическая карта, листы: М-46-05; М-46-06; М-46-11; М-46-12. Масштаб 1:200 000. – Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1982.

## REFERENCES

1. Kashkin V. B., Sukhinin, A. I., Remote sensing of the Earth from space. Digital image processing. – Moscow: Logos, 2001. – 264 p. [in Russian].
2. Chandra A. M. and Ghosh S. K. Remote sensing and geographical information system. – Moscow: Technosphere, 2008. – 312 p. [in Russian].
3. Nosin V. A. Soils of Tuva. – Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1963. – 340 p. [in Russian].
4. Chibilev A. A. Steppes of Northern Eurasia (ecological and geographical essay and bibliography). – Ekaterinburg: UB RAS, 1998. – 192 p. [in Russian].
5. Geology of the USSR. Vol. 29. The Tuva ASSR. Part 1. Geological description [under the editorship of A. V. Sidorenko]. – Moscow: Nedra, 1966. – 464. [in Russian].
6. Ondar S. O., Putintsev N. A., Ashac-ool A. C. etc. Problems of sustainability of ecosystems and assessment of their current state. – Kyzyl: Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of SB RAS, 2000. – 182 p. [in Russian].
7. Stupin V. P. Mapping of morphosystems. – Irkutsk: Publishing house of Irkutsk state technical university, 2008. – 148 p. [in Russian].
8. Kuminova A. V., Sedel'nikov V. P., Maskaev Yu. M. etc. The vegetation cover and the natural fodder lands of the Tuva ASSR. – Novosibirsk: Nauka, 1985. – 185 p. [in Russian].
9. Gomboev B. O. The agrarian land tenure of the Inner Asia. – Novosibirsk: Publishing house SB RAS, 2006. – 228 p. [in Russian].
10. Mordkovich V. G., Gilyarov A. M., Tishkov A. A., Balandin S. A. The fate of the steppes. – Novosibirsk: «Mangazeya», 1997. – 208 p. [in Russian].
11. Yakutin M. V., Dubovik D. S. Use of remote sensing data in monitoring ecosystems Turano-Uyuk depression // Geodesy and cartography. News of higher educational institutions. – 2012. – № 1. – P. 75–78. [in Russian].
12. Yakutin M. V., Dubovik D. S. On the system of indicators for monitoring the ecosystems of dry steppes // Bulletin of the SSGA. – 2012. – Vol. 2 (18). – P. 94–99. [in Russian].

13. Yakutin M. V., Dubovik D. S., Anopchenko L. Yu. Assessment of the dynamics of the water table in small lakes of Ubsunur depression (Tuva) at the remote sensing materials // Geodesy and cartography. News of higher educational institutions. – 2016. – № 1. – P. 71–74. [in Russian].
14. The official website of the U.S. geological survey. – Access mode: <http://glovis.usgs.gov> (19.03.14 g.)
15. Soil map of the Republic of Tuva. Scale 1: 1 000 000. – 1969. [in Russian].
16. Topographic map, sheets: M-46-05; M-46-06; M-46-11; M-46-12. Scale 1: 200 000. – Main Department of geodesy and cartography in the USSR Council of Ministers, 1982. [in Russian].

© Д. С. Дубовик, М. В. Якутин, 2018

## **ЭМИССИЯ КЛАСТЕРОВ ПЫЛЬЦЕВЫХ ЗЕРЕН АНЕМОФИЛЬНЫХ РАСТЕНИЙ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ ИХ ПЫЛЬЦЫ В АТМОСФЕРУ**

### ***Владимир Викторович Головко***

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская 3, кандидат биологических наук, ведущий инженер, тел. (383)330-77-43, e-mail: golovko@ns.kinetics.nsc.ru

### ***Анастасия Петровна Беланова***

Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)339-97-45, e-mail: boronina.a@inbox.ru

### ***Галина Александровна Зуева***

Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)339-97-94, e-mail: zuevagalina70@yandex.ru

Исследованы пыльцевые частицы 41 вида анемофильных растений, поступающие в атмосферу в процессе опыления. В образцах пыльцы всех изученных видов растений во всех опытах наблюдались кластеры, состоящие из двух или большего числа пыльцевых зерен. Доля пыльцевых зерен, входящих в состав таких кластеров, варьировалась от 22 до 86 %. Морфология пыльцевых зерен анемофильных растений не предотвращает образование подобных кластеров.

**Ключевые слова:** пыльца, атмосферный аэрозоль, кластеры.

## **EMISSION OF THE POLLEN GRAIN CLUSTERS OF ANEMOPHILIC PLANTS UPON POLLEN INGRESS INTO THE ATMOSPHERE**

### ***Vladimir V. Golovko***

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, SB RAS, 3, Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Lead Engineer, phone: (383)330-77-43, e-mail: golovko@ns.kinetics.nsc.ru

### ***Anastasiya P. Belanova***

Central Siberian Botanical Gardens, SB RAS, 101, Zolotodolinskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)339-97-45, e-mail: boronina.a@inbox.ru

### ***Galina A. Zueva***

Central Siberian Botanical Gardens, SB RAS, 101, Zolotodolinskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)339-97-94, e-mail: zuevagalina70@yandex.ru

A study was made of 41 pollen grains of anemophilic plants entering the atmosphere upon their pollination. The pollen samples of all studied species were observed to contain the clusters, consisting of two or more pollen grains. The portion of the pollen grains involved in these clusters varied from 22 to 83 %. The morphology of the pollen grains of anemophilic plants fails to prevent the formation of such clusters.

**Key words:** pollen, atmospheric aerosol, clusters.

Пыльца растений неизменно входит в состав крайне разнородной по своему составу и генезису группы биологических материалов и структур, каковыми являются атмосферные аэрозольные частицы биологического происхождения. Ее, наряду со спорами грибов и фрагментами грибного мицелия, бактериями, археями (архебактериями), водорослями и цианобактериями, вирусами, останками мхов, лишайников, растений и животных, как одну из наиболее массовых составляющих биогенного атмосферного аэрозоля включают в особую категорию основных биологических аэрозольных частиц (ОБАЧ). Некоторые исследователи полагают, что данные частицы могут оказывать влияние на формирование облаков и выпадение осадков и таким образом влиять на региональный климат в целом.

Пыльцевые зерна, являясь репродуктивными единицами – мужскими гаметофитами, играют ключевую роль в процессе семенного размножения растений и обмене генетическим материалом, как внутрипопуляционном, так и между удаленными популяциями. В зависимости от способа переноса пыльцы в процессе опыления различают энтомофильные (опыляемые насекомыми) и анемофильные (ветроопыляемые) растения. Собственно именно пыльцевые зерна последних являются наиболее крупными по своим размерам представителями группы ОБАЧ (физические размеры лежат в диапазоне от 10 до 100 мкм, в среднем – 20–40 мкм) [1].

Опыление ветром исходно присуще голосеменным растениям [2]. Переход к анемофилии также отмечен в 60 семействах покрытосеменных растений (~16 % от общего числа семейств данного отдела [3]) и обусловлен, видимо, малым числом насекомых-опылителей в высоких широтах. Хотя даже во внетропической области энтомофильные растения представлены большим числом видов (например, во флоре Академгородка г. Новосибирска на долю анемофильных растений приходится лишь 27,1 % видов), в растительном покрове внетропической суши как по числу особей, так и по продуцируемой биомассе наблюдается абсолютное доминирование ветроопыляемых растений. В сочетании с высокой пыльцевой продуктивностью ветроопыляемых растений они обуславливают поступление огромных количеств их пыльцы в атмосферу в периоды цветения. В эти дни в отдельных пробах массовая концентрация пыльцевой компоненты атмосферного аэрозоля может превышать 70–80 % его суммарной массовой концентрации [5]. Значительные количества пыльцы, поступающей в атмосферу, вызывают вспышки аллергических заболеваний, что обуславливает значительный интерес к процессам переноса пыльцы в атмосферу и пыльцевой эмиссии.

Рассеивание, перенос пыльцы в атмосфере и ее осаждение – физические процессы, зависящие от абиотических факторов [6]. Помимо скорости ветра, турбулентности, вертикального коэффициента диффузии и высоты источника пыльцы они обуславливаются также скоростью осаждения частиц, связанной с их аэродинамическими характеристиками (размером, формой, плотностью и характером поверхности) [7]. Эти параметры определяют эффективность покидания растительного полога, длительность пребывания в атмосфере, вероятность переноса пыльцы на значительные расстояния и успешность опыления.

При поступлении в атмосферу пыльца анемофильных растений высыхает, при этом изменяются размеры и форма пыльцевых зерен [8]. В ряде случаев, например, у амброзии возникают воздушные полости, снижающие их плотность с 1,2 до 0,84 г/см<sup>3</sup> [9]. У той же амброзии многими авторами неоднократно отмечалось образование агломератов, состоящих из значительного количества зерен пыльцы [10–13]. При образовании агрегатов аэродинамическое поведение частиц меняется из-за изменения всех их аэродинамических характеристик. Воздушные полости между зернами пыльцы снижают эффективную плотность частицы, агрегаты могут заметно отклоняться от сферической формы и иметь неровную поверхность, каковая повышает лобовое сопротивление. Скорость седиментации таких крупных частиц значительно выше, чем у отдельных зерен, что не способствует их переносу на значительные расстояния.

Пыльца ветроопыляемых растений имеет ряд морфологических особенностей, препятствующих ее слипанию и образованию агломератов. Она сухая, с тонкой и гладкой экзиной. При этом вопрос, насколько эффективно данные особенности ее морфологии препятствуют образованию агломератов, изучен сравнительно слабо.

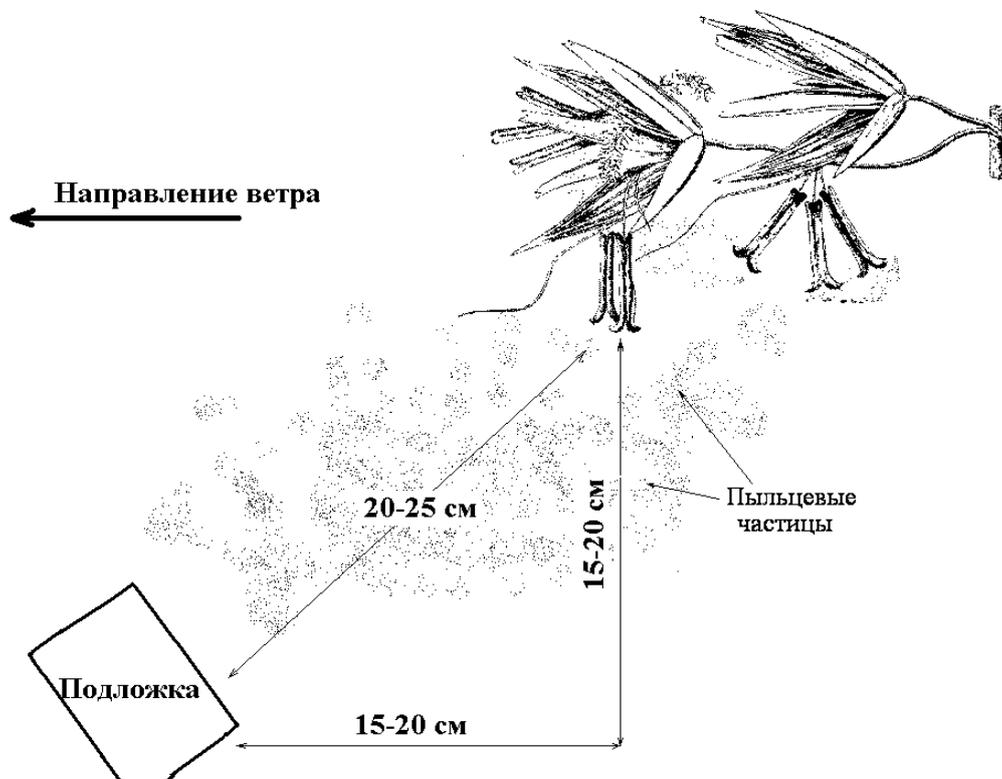
Отмечено образование значительного количества кластеров при искусственном распылении пыльцы анемофильных растений в ходе экспериментов по определению массы или скорости седиментации индивидуальных пыльцевых зерен [14]. Показано, что у амброзии полынелистной пыльца выпадает из цветков в виде кластеров. Зерна на этой стадии тесно сцеплены и образуют яркие желтые пятна на противоположающей листве, которые в последствии разрушаются и сдуваются ветром. В норме имеются три стадии, предшествующие реальному переносу пыльцы воздушными массами: а) выбрасывание слипшихся масс пыльцы из цветков; б) период длительного или короткого сцепления пыльцевых кластеров с соседней растительностью; в) флотация пыльцы ветром [7].

В настоящее время неясно как часто образование кластеров происходит при эмиссии пыльцы у других видов анемофильных растений. Образование значительных количеств кластеров во всех сериях опытов по искусственному распылению пыльцы, позволяет предположить, что и в ходе естественной эмиссии пыльцы в атмосферу должно наблюдаться подобное явление. В связи с этим в 2006 и 2017 годах были проведены две серии наблюдений для изучения процессов эмиссии пыльцы в атмосферу в природных условиях при фоновых значениях температуры и относительной влажности воздуха.

### *Материалы и методы*

Наблюдения проводились в природных условиях. Пыльца сдувалась порывами ветра с соцветий цветущих растений на подложки, покрытые глицерин-желатином (с добавлением красителя кумаши голубого) и расположенные на 20–25 см ниже. Скорость порывов ветра во время наблюдения составляла 0,3–2,0 метра в секунду. При расположении подложек учитывалось направление ветра, т.е. подложка располагалась таким образом, чтобы на нее оседала

высыпавшаяся из соцветия пыльца. Экспозиция подложек продолжалась 1–2 секунды (рисунок). Данное расстояние от соцветия до подложки (и время ее экспозиции) позволяет уловить достаточное количество частиц из сдуваемого с соцветия пыльцевого облачка (которое, как правило, хорошо заметно) и избежать случайного контакта подложки с соцветием.



Улавливание пыльцы растений в момент ее высыпания из пыльника

Одновременно с отбором проб проводились измерения температуры и относительной влажности воздуха с помощью компактного прибора Center 311 temperature meter. Отборы проб пыльцы каждого вида проводились в пятикратной повторности. Временные интервалы между отборами проб составляли несколько минут. Отобранные пробы пыльцы просматривались под микроскопом МБИ-11У42. Подсчет пыльцевых частиц (ПЧ), как одиночных пыльцевых зерен (ПЗ), так и их кластеров проводился на 10 трансектах при 20–40 кратном увеличении объектива.

### *Результаты и обсуждение*

Исследовалась эмиссия пыльцы основных групп анемофильных растений: древесных (21 вид лиственных и хвойных деревьев, являющихся основными лесообразующими породами либо широко используемых при озеленении), 11 видов злаков, доминирующих в травянистых сообществах и 9 видов сорных трав (разнотравья), широко представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН и в растительном покрове Новосибирской области.

В табл. 1, 2 и 3 приводятся даты проведения наблюдений, значения температуры воздуха и его относительной влажности во время отборов пыльцевых проб; результаты подсчета числа пыльцевых частиц и пыльцевых зерен, осевших на подложки; % доли кластеров от общего числа осевших пыльцевых частиц; доля пыльцевых зерен в составе кластеров для древесных растений, злаков и сорных трав соответственно.

Таблица 1

Наличие кластеров в пыльце древесных растений, поступающей в атмосферу

№	Видовое название	Дата	температура, °С	влажность, %	Число		Относительная доля	
					частиц	зерен	кластеров из 2 или более зерен пыльцы, %	зерен пыльцы в кластерах из 2 или более зерен пыльцы, %
1	Пихта сибирская	02.06.2006	23	35	1291	1646	18,0	35,8
		30.05.2017	17	74	618	761	16,3	32,1
2	Ольха черная	05.05.2006	22	21	2023	3364	30,7	55,4
		27.04.2017	22	48	27812	53392	38,9	68,2
3	Клен ясенелистный	20.05.2006	22	24	8326	13256	29,6	53,8
		05.05.2017	20	50	724	1756	42,8	76,4
4	Береза повислая	23.05.2006	24	43	2759	3661	18,3	38,1
		30.04.2017	8	70	967	3184	31,8	60,6
5	Облепиха крушиновидная	17.05.2006	19	44	1604	2157	19,9	41,1
		15.05.2017	25	40	420	508	13,8	28,7
6	Орех маньчжурский	10.06.2006	29	44	4594	5320	10,6	22,3
		06.06.2017	19	52	2432	4297	36,3	64,0
7	Лиственница сибирская	15.05.2006	22	41	1659	2092	16,1	32,6
		29.04.2017	17	69	409	550	18,1	39,1
8	Ель сибирская	01.06.2006	25	21	1935	2381	16,0	31,1
		22.05.2017	15	59	1158	1462	17,2	34,4
9	Сосна сибирская	15.06.2006	30	62	6327	8743	24,2	44,8
		06.06.2017	22	65	2609	4218	33,0	58,6
10	Сосна обыкновенная	12.06.2006	31	52	5290	7041	20,9	40,6
		29.05.2017	17	78	477	612	16,8	35,1
11	Тополь черный	19.05.2006	20	25	4043	6002	27,2	51,1
		30.04.2017	8	73	602	2299	47,3	86,2
12	Осина обыкновенная	13.05.2006	23	39	7682	8870	22,6	44,2
		30.04.2017	15	63	1326	3354	53,1	81,5
13	Дуб черешчатый	29.05.2006	30	44	2626	3203	14,9	30,5
		30.05.2017	23	33	981	3280	43,2	83,0
14	Лещина маньчжурская	26.04.2017	7	64	622	851	20,1	41,6
15	Лещина разнолистная	08.04.2017	11	81	5166	8466	31,6	58,2
16	Лещина рогатая	08.04.2017	11	81	3939	11021	48,1	81,5
17	Береза даурская	26.05.2017	20	56	1738	2602	23,1	48,6
18	Ель колючая	29/05.2017	20	70	1671	2030	16,9	31,6
19	Вяз гладкий	27.04.2017	7	68	1651	2779	31,6	59,3
20	Вяз мелколистный	26.04.2017	9	67	2152	3671	30,4	59,2
21	Ива лавролиственная	28.04.2017	20	45	617	756	17,7	32,8

## Наличие кластеров в пыльце злаков, поступающей в атмосферу

№	Видовое название	Дата	температура, °C	влажность, %	Число		Относительная доля	
					частиц	зерен	кластеров из 2 или более зерен пыльцы, %	зерен пыльцы в кластерах из 2 или более зерен пыльцы, %
1	Полевица гигантская	21.07.2006	21	73	357	453	17,7	35,7
		14.07.2017	23	48	2449	3971	26,0	54,3
2	Кострец безостый	12.07.2006	22	82	6824	10213	28,0	52,1
		27.06.2017	29	41	527	931	35,9	63,7
3	Ежа сборная	12.07.2006	22	82	3904	5654	22,8	46,3
		27.06.2017	28	54	1109	1957	25,9	58,0
4	Пырей ползучий	18.06.2006	29	72	2455	3435	23,3	45,0
		12.06.2017	24	57	1528	4518	56,0	85,1
5	Овсяница луговая	21.06.2006	28	73	10562	13082	17,6	33,6
		19.06.2017	25	52	380	1007	50,5	81,3
6	Двукосточник тростни- ковый	12.07.2006	25	72	7196	11419	31,6	51,2
		12.07.2017	27	49	573	976	30,0	58,9
7	Тимофеевка луговая	19.07.2006	24	73	2634	3860	24,2	48,2
		11.07.2017	28	54	1912	5857	50,8	84,0
8	Канареечник канарский	24.08.2017	26	61	1379	2159	24,7	51,9
9	Кукуруза обыкновенная	28.07.2017	16	65	458	521	11,1	21,9
10	Мискантус китайский	07.09.2017	21	53	523	922	41,9	67,0
11	Мискантус сахароцветный	07.09.2017	21	53	585	927	30,3	56,0

Как видно из таблицы 1, наличие пыльцевых кластеров отмечалось в пыльцевых пробах всех древесных растений. Их доля варьировала от 10,6 % (орех маньчжурский) до 53,1 % (осина) от общего числа всех уловленных пыльцевых частиц. При этом в состав пыльцевых кластеров входило от 22,3 до 81,5 % от общего числа зерен пыльцы, высыпающихся на подложку. В пробах пыльцы пихты сибирской, ольхи черной, лиственницы сибирской, ели сибирской, сосны сибирской, сосны обыкновенной, отобранных в 2006 и 2017 годах не наблюдалось значимых различий ни по относительному количеству кластеров, уловленных на подложки, ни по % доле пыльцевых зерен в их составе. Такие отличия отмечались в пыльцевых препаратах клена ясенелистного, березы бородавчатой, тополя черного, осины и дуба черешчатого. При этом в 2017 году среди пыльцевых кластеров данных видов отмечены частицы, в состав которых входило несколько десятков, а иногда до 100 и более пыльцевых зерен, каковые в пыльцевых пробах данных видов растений, отобранных в 2006 году не были обнаружены. Вероятно, подобные различия обусловлены тем, что в 2017 году пыльца данных видов отбиралась в самом начале периода цветения, а в 2006 – фактически в самом конце.

Пыльцевые кластеры в заметных количествах отмечены во всех пыльцевых пробах злаков (табл. 2). Доля кластеров варьировала от 11,1 % (кукуруза) до 56,0 % (пырей ползучий). В их состав входило от 21,9 до 85,1 % от общего числа пыльцевых зерен, уловленных на подложки.

В пыльцевых пробах полевицы гигантской, костреца безостого, ежи сборной, пырея ползучего, овсяницы луговой и тимофеевки луговой, отобранных в 2017 году доля кластеров от общего числа уловленных пыльцевых частиц была существенно выше, чем в пыльцевых пробах тех же злаков, отобранных в 2006 году. Отмечены также не наблюдавшиеся ранее крупные кластеры, в состав которых входили десятки пыльцевых зерен.

В пыльцевых пробах сорных трав доля кластеров от общего числа пыльцевых частиц, уловленных на подложки, варьировалась от 16,5 % (крапива двудомная) до 47,1 % (хмель обыкновенный) (табл. 3). Доля пыльцевых зерен, входящих в их состав соответственно колебалась от 36 до 86,5 % (полынь сиверса). В пробах пыльцы одних и тех же видов растений, отобранных в 2006 и 2017 годах наблюдались заметные различия как по относительной доле кластеров, от общего числа пыльцевых частиц, так и по относительной доле пыльцевых зерен в составе кластеров.

Таблица 3

Наличие кластеров при эмиссии пыльце разнотравья (сорных трав)

№	Видовое название	Дата	температура, °C	влажность, %	Число		Относительная доля	
					частиц	зерен	кластеров из 2 или более зерен пыльцы, %	зерен пыльцы в кластерах из 2 или более зерен пыльцы, %
1	Полынь горькая	21.08.2006	20	79	8131	10820	20,6	41,5
		07.08.2017	23	44	1912	2600	18,9	40,4
2	Осока большехвостая	05.05.2006	21	22	11014	14492	19,6	38,8
		06.05.2017	24	30	5296	9264	34,5	62,6
3	Конопля посевная	10.08.2006	21	72	1560	2154	21,0	42,5
		10.08.2017	22	49	10435	22930	43,9	74,5
4	Марь белая	15.08.2006	20	63	1954	3189	31,8	57,8
		05.08.2017	20	47	8478	14428	32,7	60,5
5	Хмель обыкновенный	11.08.2006	19	80	3536	5081	24,5	47,4
		06.08.2017	17	53	12404	28444	47,1	76,9
6	Подорожник ланцетный	17.07.2006	24	73	5028	7067	22,3	44,8
		29.06.2017	28	48	5094	8499	28,7	57,3
7	Василистник простой	20.07.2006	23	58	4318	6227	21,6	45,5
		14.07.2017	21	62	11743	24938	40,0	71,8
8	Крапива двудомная	17.08.2006	22	80	7117	10877	30,0	55,5
		17.08.2017	23	45	2192	2858	16,5	36,0
9	Полынь сиверса	08.08.2017	21	54	1568	6229	46,4	86,5

## *Заключение*

Поскольку, к настоящему времени, исследована пыльцевая эмиссия незначительного числа видов анемофильных растений, по сравнению с их общим количеством, представленном во флоре, полученные данные позволяют сделать лишь предварительное заключение. Они свидетельствуют о том, что поступающая в атмосферу во время цветения пыльца ветроопыляемых древесных и травянистых растений не монодисперсна. Помимо одиночных пыльцевых зерен регулярно в атмосферу поступают кластеры, содержащие от 2 до 10 и более пыльцевых зерен. Процентная доля таких кластеров от общего количества образовавшихся частиц варьируется в широких пределах и может сильно различаться у разных видов растений. Имеющиеся данные указывают на то, что доля таких кластеров даже у одного и того же вида растений может существенно изменяться, в зависимости от погодных условий и фазы цветения.

## *Выводы*

1. Поступающая во время цветения в атмосферу пыльца ветроопыляемых растений не монодисперсна, а представлена как одиночными пыльцевыми зернами, так и их кластерами из 2 или большего числа зерен пыльцы.

2. Морфологические особенности строения пыльцевых зерен анемофильных растений, призванные предотвратить слипание зерен пыльцы, могут снижать количество образующихся агломератов, но не предотвращают образование кластеров.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V. R., Huffman, A. J., Burrows, S. M., Hoose, C., Safatov, A. S., Buryak, G., Fröhlich-Nowoisky, J., Elbert, W., Andreae, M. O., Pöschl, U. and Jaenicke, R.: // Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review // *Tellus B*, 64, doi:10.3402/tellusb.v64i0.15598, 2012.
2. J. D. Ackerman // Abiotic pollen and pollination: ecological, functional, and evolutionary perspectives // *Plant Syst. Evol.* 222:167-185 (2000).
2. Niklas K. J. (1985) // The aerodynamics of wind pollination. // *Bot. Rev.* 51:328-386.
4. J. D. Ackerman // Abiotic pollen and pollination: ecological, functional, and evolutionary perspectives // *Plant Syst. Evol.* 222:167-185 (2000).
5. Пеньковская Е. Ф. // Конспект флоры окрестностей Академгородка (Новосибирская область) // *Новости географии и систематики растений Сибири.* – Новосибирск, 1973. – С. 30-88.
6. Головкин В.В., Куценогий К.П., Истомин В.Л. Счетные и массовые концентрации пыльцевой компоненты атмосферного аэрозоля в окрестностях г. Новосибирска в период цветения древесных растений. // *Оптика атмосферы и океана.* 2015. Т. 28. № 06. С. 529–533.
7. Raynor G. S., Ogden E. C., Haes J. V. Dispersion and deposition of Ragweed Pollen from Experimental Sources. *Journal of Applied Meteorology.* 1970. V. 9. N 6. P. 885-895.
8. D. E. Bianchi, D. J. Schwemmin and W. H. Wagner, Jr. // Pollen Release in the Common Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) // *Botanical Gazette*, Vol. 120, No. 4 (Jun., 1959), pp. 235-243.
9. Blackmore S., Barnes Y. S. 1986 Harmomegathic mechanisms in pollen grains. Pages 137-149 in S. Blackmore & I. K. Ferguson (eds), *Pollen end spores: form and function.* Academic Press, London.

10. Culley T. M., Weller S. W., Sakai A. K. The evolution of wind pollination in angiosperms. // Trends in Ecology and Evolution. 2002. V. 17. N 8. P. 361-369.
11. Jackson S. T., Lypord M. E. Pollen Dispersal Models in Quaternary Plant Ecology: Assumptions, Parameters, and Prescriptions // The botanical review. 1999. V. 65. N 1. P. 39-74.
12. Harrington J. B., Kurt M. Ragweed pollen density // Amer. J. Bot. 1963. V. 50. N 6. P. 532-539.
- 13 Ogden E. C., Haes J. V., Raynor G. S. Diurnal patterns of pollen emission in Ambrosia, Pleum, Zea, and Ricinus. //Amer. J. Bot. 1969, V. 56. N 1. P. 16-21.
14. Истомин В. Л., Куценогий К. П., Головко В. В. Определение аэродинамических характеристик пыльцы // Аэрозоли Сибири, Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006. – С. 260–282.

© В. В. Головко, А. П. Беланова, Г. А. Зуева, 2018

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ СЕДИМЕНТАЦИИ ПЫЛЬЦЕВЫХ ЧАСТИЦ ВЕТРООПЫЛЯЕМЫХ РАСТЕНИЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО СИБИРСКОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА СО РАН**

### ***Владимир Викторович Головки***

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, кандидат биологических наук, Leading Engineer, тел. (383)330-77-43, e-mail: golovko@ns.kinetics.nsc.ru

### **Вячеслав Лазаревич Истомин**

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15, доктор технических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)333-19-38, e-mail: impuls@hydro.nsc.ru

### ***Константин Александрович Хлебуц***

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 15, ведущий инженер, тел. (383)333-19-38, e-mail: 1798745@mail.ru

### ***Анастасия Петровна Беланова***

Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Золотогоринская, 101, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)339-97-45, e-mail: boronina.a@inbox.ru

Проведена оценка скорости седиментации пыльцевых частиц 3 видов анемофильных растений, интродуцированных в арбореуме ЦСБС СО РАН. Подсчитана процентная доля индивидуальных зерен пыльцы и их кластеров, образующихся при распылении. Определены скорость седиментации как одиночных пыльцевых зерен, так и их кластеров. Установлена зависимость скорости седиментации кластера от числа входящих в него пыльцевых зерен.

**Ключевые слова:** анемофильные растения, пыльца, пыльцевые зерна, скорость седиментации, кластеры.

## **DETERMINATION OF THE SEDIMENTATION RATES OF THE POLLEN GRAINS OF ANEMOPHILIC PLANTS GROWING OVER THE TERRITORY OF THE CENTRAL SIBERIAN BOTANICAL GARDENS OF SB RAS**

### ***Vladimir V. Golovko***

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, 3, Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Engineer, phone: (383)330-77-43, e-mail: golovko@ns.kinetics.nsc.ru

### **Vyacheslav L. Istomin**

Institute of Hydrodynamics SB RAS, 15, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)333-19-38, e-mail: istomin@hydro.nsc.ru

### ***Konstantin A. Khlebus***

Institute of Hydrodynamics SB RAS, 15, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Engineer, phone: (383)333-19-38, e-mail: 1798745@mail.ru

*Anastasia P. Belanova*

Central Siberian Botanical Gardens, SB RAS, 101, Zolotodolinskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)339-97-45, e-mail: boronina.a@inbox.ru

The sedimentation rates of the pollen grains of the anemophilic plants of three species introduced in the arboretum of the Central Siberian Botanical Garden of SB RAS were estimated. The percentage of both the individual pollen grains and their clusters formed upon pollination, was determined. The sedimentation rates were found for single pollen grains and for their clusters. The dependence of the cluster sedimentation rate on the number of pollen grains was established.

**Key words:** anemophilic plants, pollen, pollen grains, sedimentation rate, clusters.

Перенос пыльцы анемофильных растений в атмосфере обеспечивает генетический обмен между популяциями, вызывает сезонные вспышки аллергических заболеваний [1–5]. Дальность переноса и эффективность улавливания пыльцевых частиц (ПЧ) определяется скоростью седиментации. Зная ее можно построить модель переноса частиц в ламинарном ветровом потоке, моделировать распространение пыльцы в турбулентном потоке воздуха. Такие модели необходимы для сокращения пыльцевого «загрязнения» семенных питомников, оценки риска возникновения аллергических заболеваний, исследования распространения пыльцы и спор растений [6–8].

Сложная форма пыльцевых зерен (ПЗ), деформация их при высыхании, наличие кластеров из двух или большего количества ПЗ крайне затрудняют теоретические расчеты скорости седиментации переносимой по воздуху пыльцы [9–12]. Скорость седиментации ПЧ определяется экспериментально с помощью разного вида седиментометров [11, 13, 14]. Седиментация ПЧ большинства видов растений не изучена. Приводятся лишь скорости оседания индивидуальных ПЗ, а скорости седиментации кластеров из двух и более зерен – практически не исследованы [7, 15, 16]. Не определены зависимости скоростей седиментации кластеров от количества составляющих их зерен [14].

Данная работа продолжает цикл исследований, посвященных изучению распространения ПЧ в атмосфере. Ее целью является: 1) исследование кластерного состава пыльцевого аэрозоля, образующегося при распылении пыльцы; 2) экспериментальное исследование скоростей седиментации ПЗ и их кластеров трех видов растений (лещины рогатой, лещины манчжурской, лещины разнолистной), представленных в экспозиции Центрального Сибирского ботанического сада СО РАН; 3) установление зависимости скорости седиментации кластеров от числа входящих в их состав ПЗ.

### ***Методы и материалы***

Определение скорости оседания ПЧ проводилось с помощью экспериментальной установки по распылению порошкообразных материалов, (рис. 1 А) состоящей из: I – дозирующей системы и II – собственно седиментатора. Дозирующая система импульсного распыления состоит из дозатора с исследуемой

пыльцой 1, воздуховода 2, ресивера 3, электроконтактного манометра 4, электроклапана 5.

Седиментатор (II) представляет собой цилиндр 6, разделенный заслонкой 7 на две части. Его верхняя часть – приемник распыленного вещества, поступающего из дозирующей системы (I) через сопло 8. Сверху она оканчивается фильтродержателем 9 с установленными на металлической сетке фильтрами типа АФА-ХА-18 для выхода воздуха. Нижняя часть цилиндра седиментатора оканчивается храповым устройством 10, содержащим стеклянный диск для сбора распыленной пылицы.

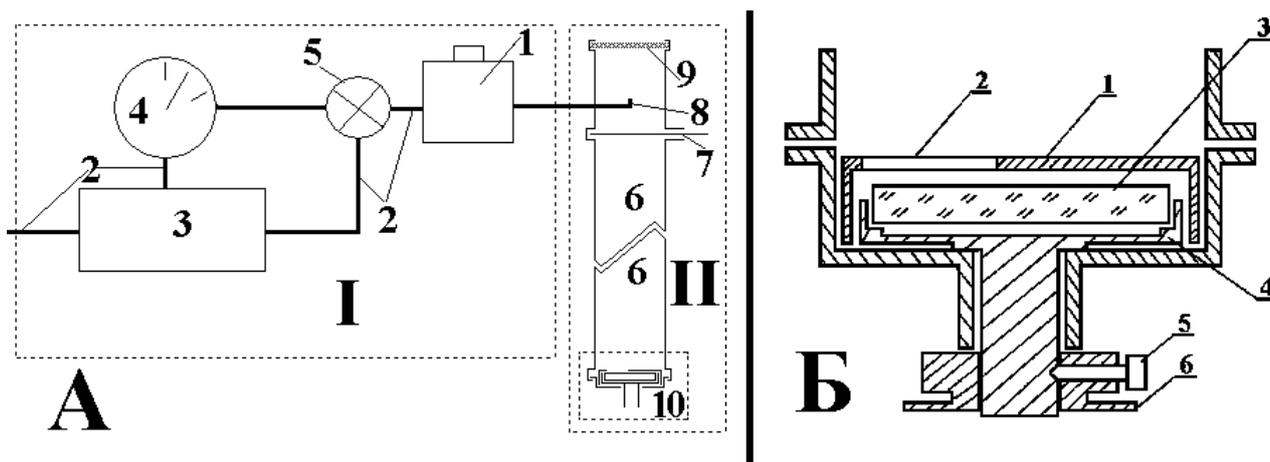


Рис. 1. А. Схема установки для распыления зерен пылицы;  
Б. Схема поворотного храпового механизма

Это устройство (рис. 1 Б) представляет собой неподвижную щелевую диафрагму 1 с окном 2, имеющим вид сектора. Ниже лежит сменный стеклянный диск 3 на вращающемся ложе 4, которое зафиксировано стопором 5 относительно храповика 6. Ложе со стеклянным диском может вращаться с переменной скоростью и имеет несколько фиксированных положений. Вращение стекла на заданный угол осуществляется храповым устройством 6. Фотография поворотного храпового устройства представлена на рис. 2 А.

В экспериментах использовался вертикальный цилиндрический канал с внутренним диаметром 70 мм. Длина нижней части от заслонки 7 (см. рис. 1 А) до стеклянного диска 3 (см. рис. 1 Б) составляла 3080 мм. Объем ресивера –  $300 \text{ см}^3$ , начальное давление в нем – 5 атмосфер. В установке использовано импульсное распыление на основные элементы, предложенное в работе [17]. В сочетании со вторым блоком (седиментометром) это позволило одновременно измерять скорость как отдельных ПЗ, так и их кластеров.

Порции пылицы весом 100 миллиграмм распылялась в верхнюю часть установки при закрытой заслонке 7. В приемной части седиментатора устанавливалась щелевая диафрагма. В опытах смена секторов осуществлялась вручную через фиксированные промежутки времени  $t_{\phi}$  секунд, начиная с первого. Для

каждого вида растений подбирался свой  $t_{\phi}$ . Последняя диафрагма в опытах экспонировалась в течение 2 минут. Сектор номер 1 служил фоном, контролирующим загрязнение стеклянной пластинки. На нем не было зафиксировано ни одной пылевой частицы.

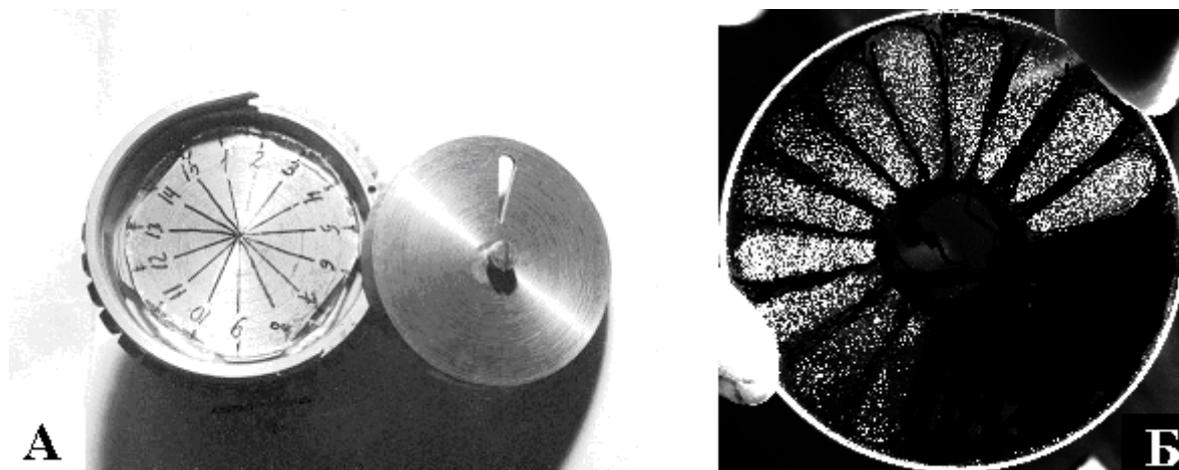


Рис. 2. А. Вид стеклянного диска в храповом механизме со щелевой диафрагмой; Б. Фотография стеклянного диска с напыленными секторами

В каждом опыте после завершения отбора образцов с осадком стеклянный диск с осевшими пылевыми частицами помещали под микроскоп МБИ-11. Типичный вид стеклянного диска с напыленными пылевыми секторами показан на рисунке 2 Б. Для закрепления пылевых частиц на стекле использовался глицерин-желатин с добавлением красителя кумаши голубого. Затем для каждого сектора просматривалось 30 полей зрения. На каждой из просматриваемых площадок отдельно подсчитывались единичные ПЗ и кластеры, содержащие 2, 3 и более ПЗ.

### *Результаты и обсуждение*

Подсчет под микроскопом позволяет определить число ПЗ в кластере, а также количество кластеров, состоящих из различного числа ПЗ, осевших на подложку. У лещины рогатой, лещины манчжурской и лещины разнолистной распознавались кластеры, содержащие до 6 ПЗ. Число ПЗ в более крупных кластерах определить удавалось не всегда т. к. в некоторых из них ПЗ располагались в два и более слоя, что затрудняло подсчет числа ПЗ, позволяя произвести его лишь приблизительно. Доля кластеров из 7 или большего количества ПЗ составляла 2–3 % от общего числа уловленных частиц. Скорости седиментации подобных кластеров не вычислялись.

Т.к. участок неравномерного движения пылевой частицы значительно меньше длины седиментационного цилиндра, при расчете скорости седиментации

было сделано допущение, что ПЗ равномерно оседают на подложку в течение всего периода экспозиции каждой диафрагмы. На каждый из одиннадцати секторов оседали частицы, скорость которых находилась в пределах от  $V_i$  до  $V_{i+1}$ , где  $i$  – номер сектора. Последние рассчитывались по следующему соотношению:

$$V_i = \frac{H}{t_i} \text{ см/с, } i = \text{от } 2 \text{ до } 11, \quad (1)$$

где  $t_i = t_{\phi}(i-2)$ ,  $H$  – высота седиментационного цилиндра.

Значение скорости седиментации частиц, оседающих в пределах выбранного сектора ( $\bar{V}_i$ ) рассчитывалось по формуле:

$$\bar{V}_i = \frac{V_i + V_{i+1}}{2}, \quad (2)$$

$V_i$  и  $V_{i+1}$  – максимальная и минимальная скорость седиментации частиц  $i$ -сектора.

Средняя скорость седиментации  $\bar{V}_j$  кластера, состоящего из  $j$  зерен, рассчитывалась по формуле:

$$\bar{V}_j = \exp \left( \frac{\sum_i n_{ij} * \ln(\bar{V}_{ij})}{\sum_i n_{ij}} \right), \quad (3)$$

где  $\bar{V}_{ij}$  – среднее геометрическое значение скорости седиментации кластеров из  $j$  частиц, оседающих на  $i$ -ый сектор,  $n_{ij}$  – число кластеров из  $j$  частиц, осевших на  $i$ -ый сектор.

Среднегеометрические отклонения  $\sigma_{gj}$  от среднего значения  $\bar{V}_j$  кластера, состоящего из  $j$  зерен рассчитывались формуле:

$$\sigma_{gj} = \exp \sqrt{\frac{\sum_i n_{ij} (\ln(\bar{V}_{ij}) - \ln(\bar{V}_j))^2}{\sum_i n_{ij}}}. \quad (4)$$

При распылении образуется огромное количество кластеров, состоящих из 2 или большего количества ПЗ. В табл. 1 приводятся данные о доле кластеров от общего числа частиц, осевших на подложки; доле ПЗ в составе кластеров из двух или большего количества зерен, от общего количества ПЗ, осевших на подложки. При распылении навесок пылицы в седиментометре пыльцевые кластеры составляют от 36,3 (лещина маньчжурская) до 42,2 % (лещина разноли-

стная) от общего количества образующихся частиц, при этом в их состав входит от 61,6 до 70,3 % распыленных ПЗ.

Таблица 1

Вклад кластеров ПЗ в количество пыльцевых частиц, осевших на подложку и доля ПЗ в составе кластеров от общего числа осевших на подложку ПЗ

Видовое название	Доля кластеров из двух или более ПЗ от общего количества осевших частиц, %	Доля ПЗ в составе кластеров из двух или более ПЗ от общего количества осевших ПЗ, %
лещина рогатая	39,1	67,3
лещина маньчжурская	36,3	61,6
лещина разнолистная	42,2	70,3

Для индивидуальных ПЗ и кластеров наблюдается заметный разброс скоростей седиментации. Число подсчитанных кластеров ( $j$  – от 1 до 6), среднегеометрические значения и среднегеометрические отклонения их скоростей седиментации растений, представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения скоростей седиментации ПЗ и их кластеров растений представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН

$j$	Условия распыления	Лещина рогатая	Лещина маньчжурская	Лещина разнолистная
j=1	Число кластеров	2631	1974	2849
	$\bar{V}_j$ , см/с	2,0	2,2	1,8
	$\sigma_g$	1,3	1,3	1,3
j=2	Число кластеров	812	611	903
	$\bar{V}_j$ , см/с	2,5	2,8	2,3
	$\sigma_g$	1,3	1,3	1,3
j=3	Число кластеров	344	280	474
	$\bar{V}_j$ , см/с	2,9	3,2	2,7
	$\sigma_g$	1,3	1,3	1,2
j=4	Число кластеров	216	135	331
	$\bar{V}_j$ , см/с	3,2	3,5	3,0
	$\sigma_g$	1,3	1,2	1,3
j=5	Число кластеров	152	51	178
	$\bar{V}_j$ , см/с	3,5	3,5	3,1
	$\sigma_g$	1,3	1,2	1,2
j=6	Число кластеров	81	32	107
	$\bar{V}_j$ , см/с	3,7	3,7	3,5
	$\sigma_g$	1,2	1,2	1,2

С увеличением размера кластеров наблюдается уменьшение числа частиц. При этом, несмотря на большое статистически значимое количество обнаруженных одиночных зерен, именно у них отмечены максимальные стандартные геометрические отклонения скорости седиментации. Видимо, это связано с варьированием размеров индивидуальных ПЗ и наличием некоторого числа абортивных ПЗ, у которых сохраняется оболочка, а внутреннее содержимое в той или иной степени разрушается, что приводит к разбросу скоростей оседания. С ростом числа ПЗ в кластере эти факторы, вероятно, взаимно компенсируются, а сам кластер становится более симметричной фигурой. В результате уменьшается разброс значений скоростей седиментации.

Скорость оседания кластера возрастает с увеличением количества составляющих его частиц. Ранее нами было показано [18], что скорости седиментации кластеров в зависимости от числа частиц в кластере хорошо аппроксимируются степенной зависимостью, построенной методом наименьших квадратов. Аппроксимационные зависимости строились из предположения, что:

$$\bar{V}_j = \bar{V}_1 j^\alpha, \quad \text{для } 1 \leq j \leq 6, \quad (5)$$

где  $\bar{V}_j$  – средняя скорость кластера состоящего из  $j$  частиц,  $\bar{V}_1$  – средняя скорость единичного зерна.

Для определения параметров  $\alpha$  и  $\bar{V}_1$  из экспериментальных данных использовался метод линейного регрессионного анализа в следующем виде:

$$Y_j = \beta + \alpha X_j, \quad (6)$$

где  $Y_j = \ln(\bar{V}_j)$ ,  $\beta = \ln(\bar{V}_1)$ ,  $X_j = \ln(j)$ . Достоверность используемой аппроксимации оценивалась по коэффициенту корреляции  $r$ .

Для исследуемых растений полученные данные можно аппроксимировать эмпирическими зависимостями, предложенными в табл. 3.

Таблица 3

Эмпирические зависимости и коэффициенты корреляции

№ п/п	Видовое название	Эмпирическая зависимость $\bar{V}_j$ , см/с	Коэффициент корреляции $r$
1	Лещина рогатая	$2,0 \cdot j^{0,347}$	0,999
2	Лещина маньчжурская	$2,2 \cdot j^{0,290}$	0,976
3	Лещина разнолистная	$1,8 \cdot j^{0,360}$	0,993

Данные табл. 3 можно подытожить следующим выводом: полученные средние значения скоростей седиментации кластеров ПЗ в зависимости от числа частиц в кластере аппроксимируются степенной зависимостью вида:

$$\bar{V}_j = a * j^k, \quad \text{для } 1 \leq j \leq 6, \quad (7)$$

где  $\bar{V}_j$  – среднее значение скорости седиментации кластера состоящего из  $j$  частиц, размерные коэффициенты  $a$  и показатель степени  $k$  находятся из экспериментальных данных для каждого вида растений. Коэффициент корреляции  $r$  – принимает значения в диапазоне  $0,976 \leq r \leq 0,999$ ,  $k$  принимает значения в диапазоне  $0,290 \leq k \leq 0,360$ . Зафиксированный диапазон  $\bar{V}_j$  от 1,8 см/с для единичного ПЗ лещины разнолистной до 3,7 см/с для кластера состоящего из шести ПЗ лещины рогатой, обусловлен различием размеров исследуемых частиц. Наличие в пробах распыленной пыльцы значительного количества кластеров, оседающих с большой скоростью, указывает на то, что подобное явление возможно и в природных условиях. Последнее предположение хорошо согласуется с тем фактом, что основное количество пыльцы оседает под кронами растений ее продуцирующих. Установленные экспериментальным путем зависимости позволяют оценить скорости седиментации кластеров, состоящих из произвольного числа зерен пыльцы, что дает возможность оценить эквивалентные диаметры таких частиц и использовать полученные значения при моделировании распространения пыльцы в атмосфере.

### **Выводы**

1. Установлено, что при экспериментальном распылении пыльцы исследованных видов ветроопыляемых растений образуются значительные количества кластеров из 2 или большего числа ПЗ, на долю которых приходится от 36,3 до 42,2 % образующихся частиц при этом в их состав входит от 61,6 до 70,3 % распыленных ПЗ.

2. Для пыльцы лещины рогатой, лещины маньчжурской, лещины разнолистной экспериментально определены скорости седиментации кластеров, в состав которых входит от 1 до 6 ПЗ.

3. Предложены эмпирические формулы зависимости скорости седиментации кластеров пыльцевых зерен анемофильных видов растений, представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН, от их размеров.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Rogers C. A., Levetin E. Evidence of long-distance transport of mountain cedar pollen into Tulsa, Oklahoma // International Journal of Biometeorology. 1998. V. 42. N 2. P. 65-72.
2. Сладков А. Н. Введение в спорово-пыльцевой анализ. М.: Наука, 1967. 268 с.
3. Doskey P.V., Ugoagwu B.J. Atmospheric deposition of macronutrients by pollen at a semi-remote site in northern wisconsin. // Atmospheric Environment. 1989. V. 23. N 12. P. 2761-2766.

- 4 Rantio-Lehtimäki A. Aerobiology of Pollen and Pollen Antigens // *Bioaerosols Handbook* / Editors: Cox C. S., Wathes C. M. / Boca Raton, Florida, Lewis Publishers Inc, 1995, pp. 387-406.
- 5 Федорова Р. В. Количественные закономерности распространения пыльцы древесных пород воздушным путем. // *Труды академии наук СССР. (Труды института географии)* - 1952. - вып. 52. - с. 91-103
- 6 Di-Giovanni F., Keyan P. G., Nasr M. E., The variability in settling velocities of same pollen and spores. // *Grana*, 1995. V. 34. N. 1, P. 39-44
- 8 Jackson S. T., Lypord M. E. Pollen Dispersal Models in Quaternary Plant Ecology: Assumptions, Parameters, and Prescriptions // *The botanical review*. 1999. V. 65. N. 1. P. 39-74.
- 9 Burrows F. M. Calculation of the primary trajectories of dust seeds, spores and pollen in unsteady winds. // *New Phytol.*, 1975, V. 75, N. 2, P. 389-403.
- 10 Owens J. N., Takaso T., Runions C. J. Pollination in conifers. // *Trends in plant science*. 1998. V. 3. N. 12. P. 1360 - 1385
- 11 Erdtman G. *Handbook of palynology* // Munksgaard, Copenhagen, Denmark. 1969. - 486 p.
- 12 Sosnoskie L. M., Webster T. M., Dales D., Rains G. C., Grey T. L., Culpepper A. S. Pollen Grain Size, Density, and Settling Velocity for Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*) // *Weed Science*. 2009. V. 57. N 4. P. 404-409.
- 13 Harrington J. B., Metzger K. Ragweed pollen density. // *Amer. J. Bot.* 1963. V. 50. N 6. P. 532-539.
- 14 Дунский В. Ф. Аэромикробиология и прогнозирование болезней растений. Аэрозоли в защите растений. // *Научные труды*. М., 1982. С. 166-191.
- 15 Истомин В.Л., Куценогий К.П. Определение скорости седиментации спор плауна агломератов. // *Теплофизика и аэромеханика*, 2001. Т. 8. № 2. с. 295-300.
- 16 Грегори Ф. *Микробиология атмосферы*. - М.: Мир, 1964. - 372 с.
- 17 Федорова Р. В., Вронский В. А. О закономерностях рассеивания пыльцы и спор в воздухе. // *Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода*. - 1980. - N 50. - С. 153-165.
- 18 Истомин В.Л., Куценогий К.П. Получение аэрозолей из порошкообразных материалов методом импульсного воздействия газом. // *Теплофизика и аэромеханика*, 1998, Т. 5, № 1, с. 75-79.

© В. В. Головки, В. Л. Истомин, К. А. Хлебус, А. П. Беланова, 2018

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СБОР КАК СРЕДСТВО СТИМУЛИРОВАНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**

*Ирина Ивановна Бочкарева*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и природопользования, тел. (983)122-85-70, e-mail: family\_i@mail.ru

*Александра Владимировна Борисова*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, студент, тел. (923)245-84-95, e-mail: alexandra.boriso2014@yandex.ru

В статье охарактеризовано понятие экологического сбора, кратко рассмотрена история его введения, охарактеризовано значение экологического сбора для ресурсосбережения в России. Приведены примеры, подтверждающие, что использование отходов для получения вторичного сырья действительно экономически выгодно для производителя за счет снижения суммы взимаемого экологического сбора.

**Ключевые слова:** экологический сбор, упаковка, производитель, окружающая среда, отход, утилизация, переработка, ресурсосбережение, вторичное сырье.

## **THE ENVIRONMENTAL FEE AS A MEANS OF STIMULATION OF RESOURCE SAVING**

*Irina I. Bochkareva*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (983)122-85-70, e-mail: family\_i@mail.ru

*Alexandra V. Borisova*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Student, phone: (923)245-84-95, e-mail: alexandra.boriso2014@yandex.ru

A concept of environmental fee, a brief history of its introduction and its role for resource-saving in Russia are described. A case-study is given confirming that manufacturers using waste for recycling get the economic benefit due to environmental fee reduction.

**Key words:** environmental fee, packaging, manufacturer, environment, waste, recycling, resource-saving, secondary raw materials.

На сегодняшний день ответственность производителей за товар и упаковочные материалы, которую они производят и которые в дальнейшем переходят в категорию твердых коммунальных отходов, практически отсутствует. Некоторые из производителей, не задумываясь добавляют излишнюю упаковку туда, где этого не требуется, например, для визуального увеличения объема товара или для дизайна продукции. Многие упаковочные материалы заканчивают свой путь на полигонах отходов, хотя их можно вторично использовать как материальный ресурс.

Целью данной работы является обоснование введения экологического сбора для изменения перспективной экологической политики предприятий, продукция которых является потенциальными источниками отходов.

Экологический сбор – это новый вид платежа, который обязаны вносить производители товара определенной категории и товара в упаковке. Другими словами, это сбор, средства от которого расходуются на дальнейшую утилизацию образовавшихся отходов, независимо от того, когда, кем и в каком регионе России они были произведены и будут утилизированы.

Обязанность внесения производителями экологического сбора в добровольном порядке была регламентирована федеральным законом от 29.12.2014 № 458-ФЗ [1]. С 2016 г. внесение сбора стало обязательным.

Экологический сбор вносится за абсолютно разные товары и упаковки, такие, как халаты хлопчатобумажные, флаконы стеклянные, банки консервные, книги электронные и пр. Нормативная база, регламентирующая процесс внесения сбора, постоянно совершенствуется и пополняется. Так, например, во избежание самодеятельности производителей и контролирующих органов на местах, распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2017 года № 2970-р, был обновлен и расширен перечень готовых товаров и упаковки, подлежащих утилизации. Впоследствии, в январе 2018 г., перечень был пересмотрен еще раз, и на сегодняшний день в нем содержится 54 группы готовых товаров и упаковок, хотя изначально он включал всего 36 групп [2].

Предполагается, что с введением экологического сбора и финансовой ответственности производителей за утилизацию отходов, в категорию которых перешли произведенные ими товары и упаковка, предприятия начнут пересматривать политику обращения с отходами на собственных производствах. От уплаты экологического сбора освобождены производители и импортеры, которые сами утилизируют отходы, тем самым не давая им попасть в окружающую среду. Также экологический сбор не платят компании, производящие упаковку и продающие ее другим организациям и компании, которые импортируют упаковку для собственных нужд, а не для продажи потребителям.

По мнению Правительства Российской Федерации, расчет и уплата экологического сбора должны стимулировать производителей уменьшать количество упаковки и разрабатывать внедрение процесса утилизации и изготовления товаров из вторичного сырья. Предприятиям будет более выгодно внедрять наилучшие доступные технологии (НДТ) для использования отходов в качестве вторичного материального ресурса.

Отдельной темой в вопросе упаковки и различных видов товаров является материал изготовления – пластик. Сегодня слишком большое количество пластиковых отходов попадает в окружающую среду и остается там на большие сроки, не разлагаясь. Многие страны массово отказываются от одноразовой посуды и упаковки из пластика, одновременно активно внедряя технологии вторичной переработки пластиковых отходов. В нашем государстве именно экологический сбор одновременно с политикой экономического стимулирования предприятий, реализующих мероприятия по охране окружающей среды и вне-

дряющих НДС, может стать «толчком» к пересмотру собственной экологической политики в этом вопросе. Этот процесс уже запущен. Например, в процессе производственной деятельности ООО «Европак» за год образовалось 47284 кг упаковки с наименованием «Картонки, ящики и коробки, из гофрированной бумаги или гофрированного картона». В связи с тем, что эта продукция произведена из вторсырья, т.е., из отходов, экологический сбор за ее производство не предусмотрен. Кроме того, за отчетный год у ООО «Европак» образовалась «Упаковка печатная из бумаги и картона» в количестве 171548 кг, из которых 137238 кг также были произведены из вторичного сырья. С учетом норматива утилизации (0,05) и ставки платы (2378 рублей), размер платы экологического сбора составил всего 7342,9 рублей. На данном примере можно рассмотреть, какую выгоду приносит использование вторичного сырья, как для производителя, так и для окружающей среды. Без использования вторсырья, компании пришлось бы заплатить экологический сбор в сумме 31641,18 рублей, то есть в 4 раза больше. Подобных примеров достаточно много.

Как бы ни возмущались производители введением нового вида платежа, именно экономические интересы могут заставить их использовать отходы как ресурс, тем самым снижая нагрузку на окружающую среду. Это снижение проявляется в уменьшении количества отходов, с одной стороны, и ресурсосбережением, с другой [3]. В рамках одного предприятия величина использования отходов в качестве вторичного сырья может выглядеть не слишком значительной, но сбережение ресурсов в масштабе государства будет существенным.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российская Федерация. Законы: О внесении изменений в Федеральный закон Об отходах производства и потребления, отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившими силу отдельных законодательных актов (положений законодательных актов) Российской Федерации [Текст]: федер.закон от 29.12.2014 № 458-ФЗ (ред. от 29.12.2014) // СПС «Консультант Плюс».

2. Российская Федерация. Распоряжение: Об утверждении перечня готовых товаров, включая упаковку, подлежащих утилизации после утраты ими потребительских свойств [Текст]: распоряжение правительства от 28.12.2017 № 2970-р (ред. от 28.12.2017) // СПС «Консультант Плюс».

3. Российская Федерация. Законы: Об отходах производства и потребления [Текст]: федер.закон от 10.01.2002 № 89-ФЗ (ред. от 01.01.2017) // СПС «Консультант Плюс».

© И. И. Бочкарева, А. В. Борисова, 2018

## **ПОЧВЕННО-ЗООЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ТУНДРОВЫХ ПОЧВ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ТАЗ (ЯНАО)**

***Владислав Семенович Андриевский***

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, тел. (383)363-90-25, e-mail: VS@issa.nsc.ru

***Михаил Владимирович Якутин***

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, тел. (383)363-90-25, e-mail: yakutin@issa.nsc.ru; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, профессор кафедры экологии и природопользования

***Наталья Павловна Косых***

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, тел. (383)363-90-18, e-mail: npkosykh@mail.ru

Статья посвящена исследованию сообщества панцирных клещей в тундровой глеевой почве в нижнем течении реки Таз. Проводится анализ научных работ, посвященных изучению панцирных клещей в зоне тундры в Евразии и Северной Америке. На основании анализа видового богатства, численностей различных видов и структуры доминирования исследованную тундровую экосистему можно признать в целом неблагоприятным местообитанием для сообщества панцирных клещей. Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что почвенно-биологические методы, и в частности методы исследования сообщества панцирных клещей, могут быть успешно использованы в экологическом мониторинге тундровых экосистем. Необходимо проведение дополнительных исследований для получения количественных характеристик особенностей изменения численностей и видового разнообразия панцирных клещей в тундровых экосистемах, испытывавших на себе различные по силе и характеру антропогенные воздействия.

**Ключевые слова:** тундра, почва, панцирные клещи, численность, видовое разнообразие, экологический мониторинг.

## **SOIL-ZOOLOGICAL METHODS IN ECOLOGICAL MONITORING OF TUNDRA SOILS OF THE LOWER REACHES OF THE TAZ RIVER (YAMAL-NENETS AUTONOMOUS DISTRICT)**

***Vladislav S. Andrievskiy***

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Biogeocenology, phone: (383)363-90-25, e-mail: VS@issa.nsc.ru

***Mikhail V. Yakutin***

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory

of Biogeocenology, phone: (383)363-90-25, e-mail: yakutin@issa.nsc.ru; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor, Department of Ecology and Environmental Management

***Nataliya P. Kosykh***

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Biogeocenology, phone: (383)363-90-18, e-mail: npkosykh@mail.ru

The article is devoted to the study of the community of soil inhabiting oribatid mites in tundra gley soil in the lower reaches of the river Taz. The analysis of scientific works devoted to the study of oribatid mites in the tundra zone in Eurasia and North America. On the basis of the analysis of species richness, numbers of different species and structure of domination the investigated tundra ecosystem can be recognized as generally unfavorable habitat for the community of oribatid mites. Conducted research allows drawing the conclusion that soil-biological methods, in particular the research methods community oribatid mites can be successfully used in ecological monitoring of tundra ecosystems. Additional studies are needed to obtain quantitative characteristics of the characteristics of changes in the numbers and species diversity of oribatid mites in the tundra ecosystems, which have experienced different strength and nature of anthropogenic effects.

**Key words:** Yamal-Nenets Autonomous district, Taz river, tundra, soil, oribatid mites, abundance, species diversity, ecological monitoring.

### ***Введение***

Одной из важнейших проблем современной экологической науки является поиск надежных методов мониторинга природных и антропогенно-трансформированных экосистем в разных регионах планеты. Наиболее широко для этих целей повсеместно используются растительные индикаторы, которые отражают техногенную нагрузку и негативное влияние на окружающую среду через изменение состояния растительного покрова: повреждение растительности, заболевание древостоев, уменьшение проективного покрытия и т.д. [1, 2]. Вместе с тем, растительность является индикатором биоразнообразия и значимости природно-ресурсного потенциала, отражающим ухудшение состояния, видового состава и ассоциированности естественной растительности [3]. Но использование растительных индикаторов при оценке влияния некоторых различных по силе и характеру антропогенных воздействий на экосистемы не всегда возможно. В ряде случаев оправданным является использование в качестве мониторинговых зоологических, альгологических и микробиологических параметров состояния биогеоценоза. К сожалению, методы экологического мониторинга с использованием этих параметров разработаны совершенно недостаточно [4].

Одна из наиболее многочисленных и важнейших групп организмов, использование данных о численностях и видовом разнообразии которых может быть с успехом использовано в почвенно-экологическом мониторинге – микроартроподы. Среди микроартропод в явно выраженной степени доминируют две таксономические группы мелких почвообитающих животных – коллемболы

и панцирные клещи (орибатидаы). Их численности в некоторых типах почв достигают сотен тысяч и даже миллионов экземпляров на квадратный метр [5].

Микроартроподы оказывают существенное и по времени очень быстрое воздействие на интенсивность деструкции органического вещества в почве. В их присутствии интенсивность разложения повышается в несколько раз. Микроартроподы – активные участники процесса разложения органического вещества в почве, но не как непосредственные разлагатели (у них не обнаружено ряда ферментов для химического разложения тканей растений), а как регуляторы активности микроорганизмов, в основном, грибов. Хотя, имеются отдельные примеры наличия у микроартропод разлагающих ферментов. Так, в кишечнике разных видов панцирных клещей обнаружены хитиназа (разлагающая клеточную стенку грибов) и трегалаза (разлагающая содержимое клеток грибов) [6]. Уровень потребления микробной биомассы у мелких беспозвоночных в сотни раз выше, чем у крупных. С учетом же большой численности, вклад этих животных в регуляцию микробного комплекса намного больше. Тем самым они влияют на рост и активность микроорганизмов, а также на видовой состав и структуру микробных сообществ, формирующихся при разложении растительных остатков [7].

Нефтедобывающая промышленность на севере Западной Сибири является основным агентом воздействия на природные экосистемы. В 1952 году в Западной Сибири впервые разведочным бурением были выявлены проявления нефти и газа. С 1963 года началась добыча углеводородов, и темпы этой добычи ежегодно возрастали. Одновременно с увеличением темпов добычи расширялись площади отчужденных и загрязненных земель. В настоящее время значительная часть нефтяных запасов крупнейших месторождений Западной Сибири выработана на 60–70 %, и на этих месторождениях идет постепенное сокращение объемов добычи нефти и газа. Но площади нарушенных экосистем продолжают увеличиваться за счет развития и реконструкции старых и освоения новых месторождений в таежной, лесотундровой и тундровой зонах [8–10].

Нефтегазовая отрасль является одной из самых экологически опасных, землеемких, с высокой пожаро- и взрывоопасностью и обладает высокой загрязняющей способностью. Большая часть химических реагентов, которые применяются при бурении скважин, добыче и подготовке нефти, сами добываемые углеводороды и примеси к ним являются веществами, вредными для живых организмов. В тоже время нефтедобыча известна повышенной аварийностью, поскольку основные производственные процессы происходят под высоким давлением, трубопроводные системы и промышленное оборудование работают в агрессивных средах [11–13].

В последнее время активно изучается влияние нефтяного загрязнения на различные компоненты таежных экосистем [14]. Появляются отдельные исследования влияния нефтяных загрязнений на почвенную мезофауну но пока только в таежной зоне [15, 16]. Но среди всех экосистем севера Западной Сибири, подверженных влиянию нефте-газодобычи, наименее изученными остаются экосистемы тундр. Западно-Сибирская тундровая область занимает крайний се-

вер Западно-Сибирской равнины и располагается целиком внутри границ морской бореальной трансгрессии. Эта область представляет собой низменную плоскую равнину, постепенно спускающуюся в сторону Карского моря. Климат континентальный с холодной зимой. Характерны сильные ветры, которые при разреженной растительности местами развевают пески, вызывая образование ландшафтов холодной песчаной пустыни. Западносибирская тундровая область находится в зоне активной циклонической деятельности и получает значительное для этих мест количество атмосферных осадков (350 мм в год на юге). По этой же причине снежный покров на юге области имеет значительную мощность – 50–70 см, но из-за перевевания залегает неравномерно. Безморозный период длится 75–45 дней. Многолетняя мерзлота распространена повсеместно, в связи с этим в западносибирской тундре усиливается воздействие на ландшафт многолетних мерзлых грунтов, поэтому здесь много гидролакколитов и термокарстовых озер [17].

Население панцирных клещей в почвах тундр планеты изучено крайне неоднородно. Значительный объем исследований выполнен в тундрах Средней и Восточной Сибири, Северной Европы и Канады [18–29]. Но данные, касающиеся населения панцирных клещей зоны тундр Западной Сибири, остаются фрагментарными [30–33]. Цель данного исследования состояла в анализе населения панцирных клещей в антропогенно ненарушенной тундровой глеевой почве в нижнем течении реки Таз для дальнейшего использования полученных результатов в разработке критериев оценки степени нарушенности тундровых экосистем в результате антропогенного воздействия.

### **Объекты и методы**

Образцы почвы для изучения населения панцирных клещей были отобраны на левом берегу реки Таз в 1 км от поселка Газ-Сале в настоящей пятнистой тундре на высоте 33 м над уровнем моря. На тундровой глеевой почве развито кустарничково-мохово-лишайниковое сообщество. Общее проективное покрытие (ОПП) кустарничкового яруса составляет 30 %. Доминантами выступают разные виды тундровых кустарничков, такие как карликовая березка (*Betula nana*), голубика (*Vaccinium uliginosum* L.), багульник (*Ledum decumbens* (Ait.) Lodd. ex Steud.), брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), толокнянка (*Arctous alpina* (L.) Nied) и шикша (*Empetrum nigrum* L.). Из кустарничковых ив встречаются такие, как сизая и полярная (*Salix glauca* L., *Salix polaris* Wahlenb.), из осок *Carex arctisibirica* (Jurtz.) Czer. Особенно характерны для плакорных тундр тоффельдия (*Tofieldia coccinea* Richards.). Кустарнички стелются между лишайниками, высота этого яруса не превышает 20–25 см. В лишайниковом покрове значительная роль принадлежит кладониям (*Cladonia rangiferina* (L.) Harm., *Cl. stellaris* (Opiz) Brodo), алекториям (*Alectoria ochroleuca* (Hoffm.) Massal., *Alectoria nigricans*) и цетрариям (*Cetraria cucullata* (Bellardi) Ach., *Cetraria islandica* (L.) Ach., *Cetraria nivalis* Ach., *Cetraria laevigata* Rassad.). Встречаются зеленые мхи (*Dicranum* sp.) и др.

Образцы почв для анализа населения орибатид отбирались по общепринятой методике в августе из верхнего (0–5 см) слоя почв в 10-кратной повторности. Выгонка клещей из почвы осуществлялась общепринятым методом термоэкции Тулльгрена-Берлезе. Извлеченные из почвы клещи помещались в постоянные препараты, в которых под микроскопом определялась их видовая принадлежность. Численности (обилие) клещей рассчитывались по стандартной методике на 1 м<sup>2</sup>, исходя из площади пробоотборника [34].

### *Результаты*

В результате проведения анализа тундровой почвы было обнаружено 11 видов панцирных клещей с суммарной средней численностью 4440 экз./м<sup>2</sup> (таблица).

Количественное распределение панцирных клещей  
в исследованных почвах (экз./м<sup>2</sup>)

№ п/п	Виды	Средняя численность
1	<i>Tectocepheus velatus</i>	2160
2	<i>Moritzoppia jamalica</i>	1240
3	<i>Oppiella</i> sp.	280
4	<i>Diapterobates dubinini</i>	200
5	<i>Moritzoppia microdentata</i>	160
6	<i>Suctobelbella</i> sp.	120
7	<i>Ceratoppia sphaerica</i>	80
8	<i>Oribatula tibialis</i>	80
9	<i>Neoribates borealis</i>	40
10	<i>Melanozetes sellnicki</i>	40
11	<i>Damaeus</i> sp.	40
Число видов		11
Суммарная средняя численность		4440

Особенностью видового состава и структуры доминирования в исследованной тундровой экосистеме является высокая степень доминирования двух видов: *Tectocepheus velatus* (48,6 % от всего сообщества) и *Moritzoppia jamalica* (27,9 %). Выраженное доминирование малого числа видов (одного-двух), среди которых преобладают эвритоппные полизональные, признается показателем нарушений, или неблагоприятности условий среды [35]. В исследуемой тундровой экосистеме явно выраженным доминантом является первый из указанных видов, являющийся широко известным космополитом, и демонстрирующий высокую численность и в других тундровых биотопах (это показано в ряде работ по тундрам европейской части России и зарубежного севера).

## *Обсуждение*

Орибатида тундровой зоны всей территории России изучены крайне недостаточно [36]. А конкретно по западносибирской тундре вообще имеются единичные публикации. Поэтому любое исследование в этом регионе и сопредельных ему является актуальным, особенно с учетом многократно показанной в литературе индикационной ценности таксоцена панцирных клещей. Так, например, в публикации Л.Г. Гришиной [30] в типичной тундре полуострова Ямал найдено 33 вида при средней численности 800 экз./м<sup>2</sup>. В этом исследовании приводится описание нескольких разнообразных местообитаний. По данным С.А. Козлова [32], в исследовании, проведенном в кустарничково-кладониевом сообществе в области границы лесотундра-тундра, зафиксировано 6 видов и не приведены данные по численностям. В работе, выполненной в пяти биотопах южной тундры Тазовского полуострова Западной Сибири обнаружено 13 видов (5–7 в зависимости от конкретного биотопа) с численностями от 2200 до 20057 экз./м<sup>2</sup> в зависимости от конкретного биотопа [33]. Таким образом, показатели видового богатства и численностей орибатид в нашем исследовании укладываются в довольно широкие диапазоны (особенно по численностям) соответствующих показателей в других исследованиях, выполненных в западносибирской тундре.

В связи с малым числом публикаций непосредственно по западносибирской тундре имеет смысл рассмотреть работы по сопредельному региону – Средней Сибири. В исследовании, выполненном на западном побережье Таймыра на южной границе арктической и северной типичной тундр в зональной пятнистой тундре, выявлено 39 видов орибатид. Это количество объясняется широким охватом разнообразных местообитаний (проанализировано восемь биотопов) [20].

В зональных моховых тундрах подзоны типичных тундр Западного Таймыра обнаружено 33 вида панцирных клещей. Но в конкретных обследованных местообитаниях видовое богатство не превышало показателя 14. При этом показатель численности в среднем составлял 4500 экз./м<sup>2</sup>, тогда как в большинстве случаев он не превышал 2000 экз./м<sup>2</sup>, хотя в отдельных, наиболее благоприятных по условиям, местообитаниях, обилие достигало 20000 экз./м<sup>2</sup> [18]. В почвах субарктической тундры европейского севера указаны показатели численностей орибатид – 5–20 тысяч экз./м<sup>2</sup>, то есть, в том же диапазоне, что и в сибирских тундровых сообществах [37]. По количественным показателям сообществ орибатид западносибирской и сопредельной ей среднесибирской тундр, группировки панцирных клещей этой ландшафтной зоны являются более бедными, чем более южные природные зоны, но они богаче более северных арктических тундр.

## *Заключение*

Таким образом, исходя из количественных показателей сообщества панцирных клещей (видового богатства и численностей) и качественных показателей (структуры доминирования и наличия эвритопного полизонального вида-

доминанта) исследованную тундровую экосистему можно признать в целом неблагоприятным местообитанием для их сообщества, что, по-видимому, является общей чертой для тундровых экосистем Сибири вообще. Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что почвенно-биологические методы и, в частности, анализ таксоценоза панцирных клещей, могут быть успешно использованы в экологическом мониторинге тундровых экосистем. Необходимо проведение дополнительных исследований для получения количественных характеристик сообществ панцирных клещей и особенностей их изменения в тундровых экосистемах, испытавших на себе различные по силе и характеру антропогенные воздействия.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Виноградов Б. В., Орлов П. П., Снакин В. В. Биотические критерии выделения зон экологического бедствия России // Известия РАН. Сер. Географическая. – 1993. – №5. – С. 77–89.
2. Дончева А. В., Казаков Л. К., Калущков В. Н. Ландшафтная индикация загрязнения природной среды. – М.: Экология, 1992. – 254 с.
3. Заиканов В. Г., Минакова Т. Б. Геоэкологическая оценка территорий. – М.: Наука, 2005. – 319 с.
4. Звягинцев Д. Г., Бабьева И. П., Зенова Г. М. Биология почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 445 с.
5. Стриганова Б. Р., Порядина Н. М. Животное население почв бореальных лесов Западно-Сибирской равнины. – М.: КМК, 2005. – 232 с.
6. Siepel H., de Ruiter-Dukman E. M. Feeding guilds of oribatid mites based on their carbohydrase activities // Soil Biology and Biochemistry. – 1993. – Vol. 25. – № 11. – P. 1491–1497.
7. Бызов Б. А. Зоомикробные взаимодействия в почве. – М.: ГЕОС, 2005. – 212 с.
8. Васильев С. В. Воздействие нефтегазодобывающей промышленности на лесные и болотные экосистемы. – Новосибирск: Наука, 1998. – 136 с.
9. Гриценко А. И., Аكوпова Г. С., Максимов В. М. Экология. Нефть и газ. – М.: Наука, 1997. – 598 с.
10. Кочуров Б. И. Экодиагностика и сбалансированное развитие. – М.; Смоленск: Маджанта, 2003. – 384 с.
11. Касьянова Н. А., Соколовский Э. В., Шимкевич С. В. Результаты прогноза аварий скважин и прорывов трубопроводных систем по геодинамическому фактору (на примере Усть-Балыкского нефтяного месторождения, Западная Сибирь) // Нефтяное хозяйство. – 1998. – № 9–10. – С. 75–77.
12. Кокориз М. Д., Лесковец О. В., Ребриев В. Г. Источники загрязнения и возможные виды воздействия на природные компоненты при обустройстве и эксплуатации месторождений // Нефтяное хозяйство. – 1998. – № 1. – С. 69–70.
13. Михайлова Л. В., Акатьева Т. Г., Волкова С. С. и др. Исследование состава, токсичности и экологической опасности буровых шламов в Нижневартовском районе // Селекционно-генетические и экологические проблемы эукариот. – Тюмень: Тюменский госуниверситет, 1995. – С. 72–82.
14. Экология Ханты-Мансийского автономного округа / Сост. Л. Н. Добринский, В. В. Плотников. – Тюмень: Софт Дизайн, 1997. – 288 с.
15. Некрасова Л. С. Изучение почвенной мезофауны в районе нефтяного загрязнения Среднего Приобья // Животные в условиях антропогенного ландшафта. – Свердловск, 1990. – С. 37–48.

16. Соромотин А. В. Мезофауна нефтезагрязненных почв Среднего Приобья. – Екатеринбург, 1991. – 24 с.
17. Мильков Ф. Н. Природные зоны СССР. – М.: Мысль, 1977. – 296 с.
18. Ананьева С. И., Криволицкий Д. А., Чернов Ю. И. Панцирные клещи (Oribatei) в подзоне арктических тундр на северо-востоке Таймыра // Арктические тундры и полярные пустыни Таймыра (ред. В. Д. Александрова, Н. В. Матвеева). – Л.: Наука, 1979. – С. 144–148.
19. Бызова Ю. Б., Уваров А. В., Губина В. Г. и др. Почвенные беспозвоночные беломорских островов Кандалакшского заповедника. – М.: Наука, 1986. – 311 с.
20. Гришина Л. Г., Бабенко А. Б., Чернов Ю. И. Панцирные клещи (Sarcoptiformes, Oribatei) западного побережья Таймыра // Вестник зоологии. – 1998. – Т.32. – № 1–2. – С.116–118.
21. Зенкова И. В., Зайцев А. С., Залиш Л. В., Лисковая А. А. Почвообитающие панцирные клещи (Acari-formes: Oribatida) таежной и тундровой зон Мурманской области // Труды Карельского научного центра РАН. – 2011. – № 1. – С. 54–67.
22. Криволицкий Д. А., Зайцев А. С., Ласкова Л. М. География биоразнообразия панцирных клещей Европейского Севера России. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. – 36 с.
23. Ласкова Л. М. Биоразнообразие панцирных клещей Карелии / Биогеография Карелии // Тр. КарНЦ РАН. Серия биология. – 2001. – Вып. 2. – С. 125–132.
24. Леонов В. Д., Рахлеева А. А. К вопросу о сходстве и различиях горных и равнинных тундр Кольского полуострова на основе данных по панцирным клещам (Acari: Oribatida) // Евразийский энтомологический журнал. – 2015. – Т. 14. – № 5. – С. 489–499.
25. Сидорчук Е. А. К фауне панцирных клещей Полярного Урала // Зоологический журнал. – 2009. – Т. 88. – № 7. – С. 800–808.
26. Чернов Ю. И., Матвеева Н. В. Ландшафтно-зональное распределение видов арктической биоты // Успехи современной биологии. – 2002. – Т. 122. – № 1. – С. 26–45.
27. Behan-Pelletier V. M. Oribatid Mites (Acari: Oribatida) of the Yukon / Insects of the Yukon // Biological Survey of Canada (Terrestrial Arthropods) (Eds. by H. V. Danks and J. A. Downes). – Ottawa, 1997. – P. 115–149.
28. Mehl R. Checklist of Norwegian ticks and mites (Acari) // Fauna Norw. – 1979. – Ser. B 26. – P. 31–45.
29. Seniczak S., Seniczak A., Graczyk R., Tømmervik H., Coulson S. J. Distribution and population characteristics of the soil mites *Diaferobates notatus* and *Svalbardia paludicola* (Acari: Oribatida: Ceratozetidae) in High Arctic Svalbard (Norway) // Polar Biology. – 2017. – Vol. 40. – P. 1545–1555.
30. Гришина Л. Г. Панцирные клещи севера Сибири // Членистоногие Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 14–23.
31. Зайцев А. С. География распространения панцирных клещей России // Вестник МГУ. – 2001. – Сер. 5, География. – № 6. – С. 34–37.
32. Козлов С. А. Особенности видового состава панцирных клещей – орибатид в биотопах Западно-Сибирской Арктики // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.
33. Andrievskii V. S., Barsukov P. A., Bashkin V. N. Application of Soil Oribatid Mites as Bioindicators in Impact Areas of the Gas Industry in the West Siberian Tundra // The Open Ecology Journal. – 2015. – № 8. – P. 32–39.
34. Методы почвенно-зоологических исследований / под ред. М. С. Гилярова. – 1975. – М.: Наука. – 275 с.
35. Кузнецова Н. А. Организация сообществ почвенных ногохвосток. – М.: ГНО «Прометей» МПГУ, 2005. – 245 с.
36. Криволицкий Д. А., Лебрен Ф., Кунст М. и др. Панцирные клещи: морфология, развитие, филогения, экология, методы исследования, характеристика модельного вида *Notrus palustris* C. L. Koch, 1839. – М.: Наука, 1995. – 224 с.

37. Мелехина Е. Н. Таксономическое разнообразие и ареалогия орибатид (Oribatei) Европейского севера России // Известия Коми научного центра Уро РАН. – Выпуск 2 (6). – Сыктывкар, 2011. – С. 30–37.

## REFERENCES

1. Vinogradov B. V., Orlov P. P., Snakin V. V. The biotic criteria are of ecological disaster zones of Russia // *Izvestiya RAN. Ser. Geographical.* – 1993. - №. 5. – P. 77–89. [in Russian].
2. Doncheva A.V., Kazakov L. K., Kalutskov V. N. Landscape indication of environmental pollution. – Moscow: Ecology, 1992. – 254 p. [in Russian].
3. Shikanov V. G., Minakova T. B. Geocological assessment of territories. – Moscow: Nauka, 2005. – 319 p. [in Russian].
4. Zvyagintsev D. G., Babyeva I. P., Zenova G. M. Soil biology. – Moscow: Moscow State University Publishing House, 2005. – 445 p. [in Russian].
5. Striganova B. R., Poryadina N. M. Animal population of soils of boreal forests of the West Siberian plain. – Moscow: KMK, 2005. – 232 p. [in Russian].
6. Sipel H., de Ruiter-Dukman E. M. Feeding guilds of oribatid mites based on their carbohydrase activities // *Soil Biology and Biochemistry.* – 1993. – Vol. 25. – №. 11. – P. 1491–1497.
7. Byzov B. A. Zoo-microbial interactions in the soil. – M.: GEOS, 2005. – 212 p. [in Russian].
8. Vasiliev S. V. The impact of the oil and gas industry on the forest and wetland ecosystems. – Novosibirsk: Nauka, 1998. – 136 p. [in Russian].
9. Gritsenko A. I., Akopova G. S., Maksimov V. M. Ecology. The oil and gas. – Moscow: Nauka, 1997. – 598 p. [in Russian].
10. Kochurov B. I. Ecodiagnostics and balanced development. – Moscow–Smolensk: Magenta, 2003. – 384 p. [in Russian].
11. Kasyanova N. A., Sokolovsky E. V., Shimkevich S. V. Results of the forecast of accidents of wells and breakthroughs of pipeline systems on the geodynamic factor (on the example of Ust-Balyk oil field, Western Siberia) // *Oil economy.* – 1998. – № 9–10. – P. 75–77. [in Russian].
12. Kokoris M. D., Leskovec O. V., Rebriev V. G. Sources of pollution and possible impacts on the natural components in the development and exploitation of birthglaces // *Oil industry.* – 1998. – № 1. – P. 69–70. [in Russian].
13. Mikhailova L. V., Akatyeva T. G., Volkov S. S., et al. Study of the composition, toxicity and environmental risk of drill cuttings in the Nizhnevartovsk region // *Breeding, genetics and environmental problems of eukaryotes.* - Tyumen: Tyumen State University Press, 1995. – P. 72–82. [in Russian].
14. Ecology of the Khanty-Mansi Autonomous District / Comp. L. N. Dobrinskiy, V. V. Plotnikov. – Tyumen: Soft Design, 1997. – 288 p. [in Russian].
15. Nekrasova L. S. Study of soil mesofauna in the area of oil pollution of the middle Ob region / *Animals in an anthropogenic landscape.* – Sverdlovsk, 1990. – P. 37–48. [in Russian].
16. Soromotin A. V. Mesofauna of oil-contaminated soils of the Middle Ob region. – Yekaterinburg, 1991. – 24 p. [in Russian].
17. Milkov F. N. Natural zones of the USSR. – Moscow: Mysl', 1977. – 296 p. [in Russian].
18. Anan'eva S. I., Krivolutskii D. A., Chernov, Y. I. Oribatid mites (Oribatei) in the subzone of Arctic tundras in the northeast of the Taimyr Peninsula / *Arctic tundra and polar deserts of Taimyr Peninsula* (eds. V. D. Alexandrov, N. V. Matveeva). – Leningrad: Nauka, 1979. – P. 144–148. [in Russian].
19. Byzova Yu. B., Uvarov A. V., Gubina V. G., et al. Soil invertebrates of the white sea Islands of the Kandalaksha reserve. – Moscow: Nauka, 1986. – 311 p. [in Russian].

20. Grishina L. G., Babenko A. B., Chernov Yu. I. Oribatid mites (Sarcoptiformes, Oribatei) of the Western coast of Taimyr Peninsula // *Vestnik zoologii*. – 1998. – Vol. 32. – №1–2. – P. 116–118. [in Russian].
21. Zenkova I. V., Zaitsev A. S., Zalish L. V., Liskovaya A. A. Soil inhabiting oribatid mites (Acariformes: Oribatida) in taiga and tundra zones of the Murmansk region // *Proceedings of Karelian Research Centre of RAS*. – 2011. – №. 1. – P. 54–67. [in Russian].
22. Krivolutskiy D. A., Zaitsev A. S., Laskova L. M. The geography of biodiversity oribatid mites of the European North of Russia. – Petrozavodsk: KSC RAN, 1999. – 36 p. [in Russian].
23. Laskova L. M. Biodiversity of oribatid mites in Karelia / *Biogeography of Karelia* // *Proceedings of Karelian Scientific Centre of RAS. Series biology*. – 2001. – Vol. 2. – P. 125–132. [in Russian].
24. Leonov V. D., Rakhleeva A. A. To the question about the similarities and differences between mountain and lowland tundra of the Kola Peninsula on the basis of data on oribatid mites (Acari: Oribatida) // *Eurasian entomological journal*. – 2015. – Vol. 14. – № 5. – P. 489–499. [in Russian].
25. Sidorchuk E. A. To the fauna of oribatid mites in the Polar Urals // *Zoological journal*. – 2009. – Vol. 88. – № 7. – P. 800–808. [in Russian].
26. Chernov Yu. I., Matveeva N. V. Landscape-zonal distribution of Arctic biota // *Advances in modern biology*. – 2002. – Vol. 122. – № 1. – P. 26–45. [in Russian].
27. Behan-Pelletier V. M. Oribatid mites (Acari: Oribatida) of the Yukon / *Insects of the Yukon* // *Biological Survey of Canada (Terrestrial Arthropods)* (Eds. by H. V. Danks and J. A. Downes). – Ottawa, 1997. – P. 115–149.
28. Mehl R. Checklist of Norwegian ticks and mites (Acari) // *Fauna Norw.* – 1979. – Ser. B 26. – P. 31–45.
29. Seniczak S., Seniczak A., Graczyk R., Tømmervik H., Coulson S. J. Distribution and population characteristics of the soil mites *Diapterobates notatus* and *Svalbardia paludicola* (Acari: Oribatida: Ceratozetidae) in High Arctic Svalbard (Norway) // *Polar Biology*. – 2017. – Vol. 40. – P. 1545–155.
30. Grishina L. G. Oribatid mites of the North Siberia / *Arthropods of Siberia and the Far East*. – Novosibirsk: Nauka, 1985. – P. 14–23. [in Russian].
31. Zaitsev A. S. The geographical spread of oribatid mites of Russia // *Vestnik Moscow State University*. – 2001. – Ser. 5, Geography. – № 6. – P. 34–37. [in Russian].
32. Kozlov S. A. Peculiarities of the species composition of oribatid mites in habitats of the West Siberian Arctic region // *Modern problems of science and education*. – 2014. – № 6. [in Russian].
33. Andrievskii V. S., Barsukov P. A., Bashkin V. N. Application of Soil Oribatid Mites as Bioindicators in Impact Areas of the Gas Industry in the West Siberian Tundra // *The Open Ecology Journal*. – 2015. – № 8. – P. 32–39.
34. *Methods of soil-zoological studies* (ed. by M. S. Gilyarov). – 1975. – Moscow: Nauka. – 275 p. [in Russian].
35. Kuznetsova N. A. Organization of communities of soil stringtails (Collembola). – Moscow: GNO «Prometeii» MPGU, 2005. – 245 p. [in Russian].
36. Krivolutsky D. A., Lebrun F., Kunst M., et al. Oribatid mites: morphology, development, phylogeny, ecology, methods of study, characterization of model species *Notrus palustris* C. L. Koch, 1839. – Moscow: Nauka, 1995. – 224 p. [in Russian].
37. Melekhina E. N. Taxonomic diversity and areology of oribatid mites. (Oribatei) of the European North of Russia // *Proceedings of the Komi Scientific Center of UB RAS*. – Issue 2 (6). – Syktyvkar, 2011. – P. 30–37. [in Russian].

© В. С. Андриевский, М. В. Якутин, Н. П. Косых, 2018

## **ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРОЦЕССОВ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

*Руслана Александровна Амикишиева*

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, студент, e-mail: ruslana215w@mail.ru

*Татьяна Владимировна Ярославцева*

ФБУН Новосибирский НИИ гигиены, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: tani-ta@list.ru

*Владимир Федотович Рапута*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, e-mail: raputa@sccc.ru

Представлена геоинформационная система численного анализа данных наблюдений атмосферного загрязнения. Предложены методы построения D-оптимальных планов, модели реконструкции полей концентраций и оценивания суммарных выпадений примесей. Осуществлена программная реализация алгоритмов и интеграция с Google Maps. Созданная программа позволяет численно восстанавливать и визуализировать на карте поля загрязнения, моделировать оптимальные планы эксперимента и оценивать суммарные выпадения.

**Ключевые слова:** атмосфера, источник примеси, ГИС-технологии, геоинформационная система, Google карты, данные мониторинга, обратная задача, численное моделирование.

## **GEOINFORMATION SYSTEM OF EXPERIMENT PLANNING AND ANALYSIS OF ATMOSPHERIC POLLUTION PROCESSES**

*Ruslana A. Amikishieva*

Novosibirsk National Research State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Student, e-mail: ruslana215w@mail.ru

*Tatyana V. Yaroslavtseva*

FBSI «Novosibirsk Scientific Research Institute of Hygiene» of Rospotrebnadzor, 7, Parkhomenko, Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: tani-ta@list.ru

*Vladimir F. Raputa*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, e-mail: raputa@sccc.ru

Geoinformation system of quantitative analysis of atmospheric pollution observations was executed. Methods to D-optimal plan project, models to estimate total precipitated impurity and reconstruct concentration fields used by the system are offered. The algorithms work implemented with program and integrated with Google Maps. The system restores and visualizes contamination fields on Google Map gradually, constructs optimal experience plan and evaluates total precipitated impurity.

**Key words:** atmosphere, impurity source, GIS technologies, geoinformation system, Google Maps, monitoring data, inverse problem, numerical simulation.

## ***Введение***

В настоящее время экологические проблемы порождают повышенный интерес к активным исследованиям и выработке новых решений. Многопараметрический характер атмосферных процессов, состава примесей, структуры источников загрязнения воздуха указывает на необходимость комплексных решений по оценке и прогнозу состояния окружающей среды [1–5]. В связи с этим возникает потребность в создании информационных систем, способных всесторонне анализировать данные наземного и спутникового мониторинга загрязнения. Целью исследования является разработка программы для численного анализа данных мониторинга атмосферного загрязнения территорий. Для построения системы следует использовать малопараметрические модели оценивания процессов загрязнения и методы численного построения оптимальных планов эксперимента [6–10]. Необходима, также, формулировка требований к информационной системе, проектировка ее архитектуры и осуществление программной реализации [11–17].

Функциональность разрабатываемой системы включает: реконструкцию полей концентраций от источника выбросов, оценку суммарных выпадений примесей, построение оптимального плана по размещению точек отбора проб. В программе используются данные наблюдений наземного мониторинга, параметры источника, информация о текущих метеорологических и климатических условиях. Построение моделей реконструкции осуществляется методами постановок обратных задач переноса примеси в атмосфере, что позволяет установить компромисс между модельными описаниями процессов и данными мониторинга [6, 8].

## ***Материалы и методы исследования***

Модель численной реконструкции поля длительных выпадений примеси от монодисперсного аэрозольного источника имеет вид [6]:

$$C(r, \varphi, \vec{\theta}) = \theta_1 r^{\theta_2} \exp\left(\frac{-2r_{max}}{r}\right) P(\varphi + 180^\circ). \quad (1)$$

Здесь  $r$  – расстояние от источника (км),  $r_{max}$  – константа (км), которая определяется эффективной высотой источника, и её оценка, согласно [3], может составлять 15-20 высот источника,  $\theta_1, \theta_2$  – агрегированные параметры, зависящие от метеорологических условий приземного слоя атмосферы, средней скорости оседания аэрозольных частиц, мощности и эффективной высоты источника. Для оценки  $\theta_1, \theta_2$  используется метод наименьших квадратов и данные наблюдений в опорных точках.

Повторяемость направлений ветра  $P(\varphi)$  обычно задаётся в табличном виде по 8-ми или 16-ти румбам. Для её непрерывного описания между румбами ис-

пользуется линейная интерполяция по углу  $\varphi$ . Приведенная зависимость (1) позволяет оценить поля концентрации монодисперсной примеси в заданном радиальном направлении от источника.

В случае примеси грубого полидисперсного состава используется модель реконструкции следующего вида:

$$\sigma(r, \vec{s}) = s_1 G(r, s_2, s_3), \quad (2)$$

где  $G(r, \vec{s}) = r^{s_2} \exp\left(\frac{-s_3}{r}\right)$ ,  $r$  – расстояние от источника (км),  $s_1 > 0, s_2 > 0, s_3 > 0$ .

Параметры  $s_1, s_2, s_3$  являются агрегированными величинами, зависящими от высоты и мощности источника, характеристик дисперсного состава, типичных метеоусловий.

В случае кольцеобразной области  $\Omega$  расчёт суммарных выпадений примеси разнородного дисперсного состава с учётом выражения (2) проводится по формуле:

$$Q_{sum} = \int_0^{2\pi} s_1(\varphi) d\varphi \cdot \int_{R_1}^{R_2} G(r, s_2, s_3) r dr. \quad (3)$$

Соотношение (3) позволяет существенно упростить вычисление суммарных выпадений пыли в различных областях и оптимизировать количество точек отбора проб.

При условии стационарности аэрозольных выбросов примесей от источника и известной зимней розе ветров оценивание суммарных выпадений можно провести с использованием двух-трёх опорных точек наблюдений. С учётом соотношения (1) расчёт суммарных выпадений монодисперсной примеси проводится по формуле, аналогичной (3):

$$Q_{sum} = \int_0^{2\pi} \frac{s_1}{g_0} P(\varphi) d\varphi \cdot \int_{R_1}^{R_2} G(r, s_2, s_3) r dr. \quad (4)$$

Для размещения точек отбора проб используются методы теории оптимального эксперимента [9, 10]. Под планом эксперимента подразумеваем множество  $\varepsilon$  такое, что:

$$\varepsilon = \left\{ \begin{matrix} x_1, x_2, \dots, x_n \\ c_1, c_2, \dots, c_n \end{matrix} \right\}, \quad (5)$$

где  $x_i$  – точки, в которых проводились измерения,  $C_i$  – плотность распределения измерений в этих точках.

Пусть  $C(r, \vec{\theta})$  – концентрация примеси.

Рассмотрим D-оптимальные планы [10], максимизирующие определитель информационной матрицы  $M(\varepsilon(\vec{\theta})) = F \cdot F^T$ , где  $F = \|f_1(r, \vec{\theta}), \dots, f_m(r, \vec{\theta})\|$ ,  $f_i(r, \vec{\theta}) = \frac{\partial C}{\partial \theta_i}, i = \overline{1, m}$ ,  $T$  – операция транспонирования матрицы.

Алгоритм построения локально-оптимального плана состоит из следующих этапов [10]:

1. Проведено  $N - 1$  наблюдение по невырожденному плану

$$\varepsilon_{N-1}, |M(\varepsilon_{N-1}, \vec{\theta}_N)| \neq 0.$$

2. Определяется точка  $x_N$  такая, что

$$d(x_N, \varepsilon_{N-1}, \vec{\theta}_N) = \max_{x \in \Omega} d(x, \varepsilon_{N-1}, \vec{\theta}_N),$$

где  $d(x, \varepsilon_{N-1}, \vec{\theta}_N) = \vec{f}^T(x, \vec{\theta}) \cdot M^{-1} \cdot \vec{f}(x, \vec{\theta})|_{\vec{\theta}=\vec{\theta}_{N-1}}$ .

В точке  $x_N$  выполняется дополнительное наблюдение  $y_N = C(x_N)$ .

3. Проводим МНК-оценку  $\vec{\theta}_N$  по  $N$  наблюдениям, согласно плану

$$\varepsilon_N = \frac{N-1}{N} \varepsilon_{N-1} + \frac{1}{N} \varepsilon(x_N).$$

Цикл с 1-го по 3-й пункт повторяется до тех пор, пока  $|M^{-1}(\varepsilon_N, \vec{\theta}_N)|/N > c$ , где  $c$  – некоторая заданная константа.

При разработке программы использовалась библиотека JAMA (англ. Java Matrix Library), представляющая собой наиболее полный контейнер функций и задач численной линейной алгебры. Программное обеспечение создано и выпущено как общественное достояние совместно американской компанией The MathWorks и Национальным институтом стандартов и технологий (NIST) [15].

Используемая в работе версия JAMA включает в себя шесть Java-классов: Matrix, CholeskyDecomposition, LUDecomposition, QRDecomposition, SingularValueDecomposition и EigenvalueDecomposition. В их функционал входит соответственно:

- базовые математические операции с матрицами, нахождение детерминанта матрицы, собственных значений и векторов;
- разложение Холецкого;
- LU-разложение матрицы;
- QR-разложение матрицы;
- сингулярное разложение;
- обращение матриц.

Для написания кода использовалась интегрированная среда разработки IntelliJ IDEA для языка программирования Java, созданная компанией JetBrains.

### *Результаты и обсуждения*

Разработанная геоинформационная система осуществляет численный анализ процессов загрязнения окрестностей источника промышленных выбросов, используя моно- и полидисперсные модели оценивания полей концентраций примеси по данным наблюдений. Система была апробирована на данных мони-

торинга загрязнения снежного покрова в 2013 и 2017 гг. в окрестностях Искитимского цементного завода.

Система включает в себя несколько модулей. В первом производится численная реконструкция с последующей визуализацией и наложением на Google-карту полей газо-аэрозольного загрязнения окрестностей источника выбросов.

На рис. 1 представлен интерфейс для ввода параметров источника, таких как геометрическая высота источника, внутренний диаметр трубы, средняя скорость ветра, средняя температура и т.д. На основе сформированных данных вычисляются эффективная высота источника и константа  $\Gamma_{max}$ , необходимая при восстановлении поля концентраций примеси по монодисперсной модели. На рис. 2 приведена графическая реализация розы ветров по 16-ти румбам для зимнего периода времени, в котором преобладают ветра южного и юго-западного направления.

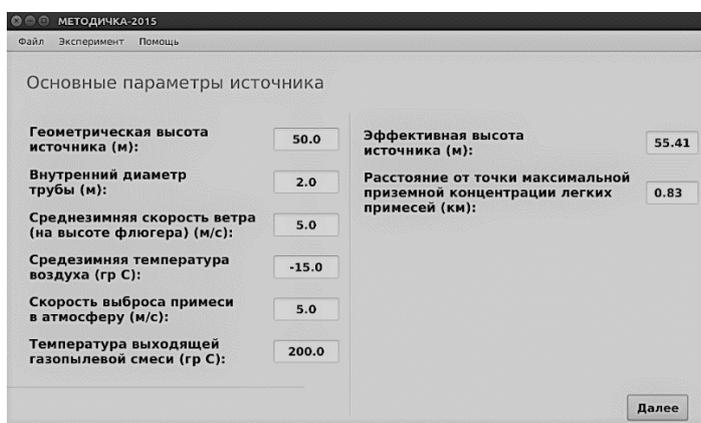


Рис. 1. Пользовательский интерфейс для ввода параметров источника

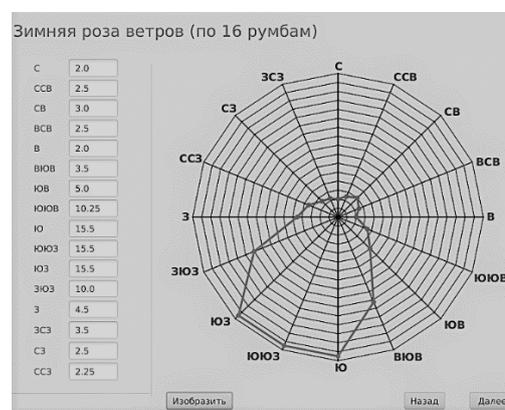


Рис. 2. Интерфейс для ввода розы ветров по 16-ти румбам

В этап подготовки экспериментальных данных для моно- и полидисперсной моделей реконструкции входит:

- получение предварительной оценки по рациональному размещению точек отбора проб и направления маршрута пробоотбора (функции модуля планирования);
- ввод результатов физико-химических исследований в опорных точках наблюдений (рис. 3).

В модуле планирования реализован алгоритм построения D-оптимального плана размещения точек отбора проб относительно источника выбросов. В качестве входных данных алгоритму необходима первичная оценка параметров модели или значения концентрации примеси в нескольких (от 2-х до 3-х) точках, чтобы провести эту начальную оценку. На выходе функция модуля выдаёт оптимальные координаты точек отбора проб по выбранному направлению относительно источника примеси.

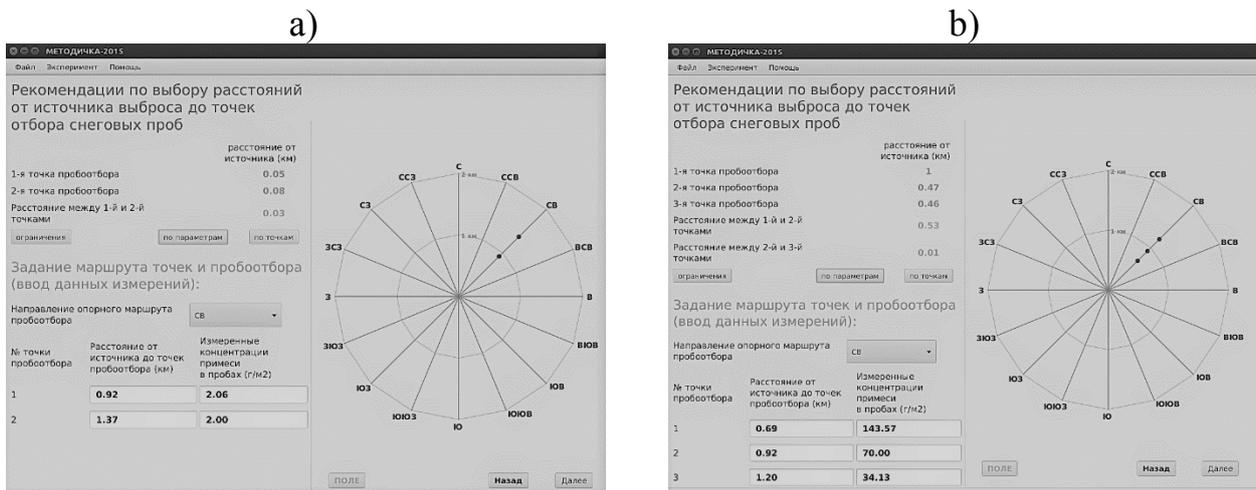


Рис. 3. Размещение точек отбора проб в моно- (а) и полидисперсном (б) случаях

В отдельном окне показана графическая реализация численно реконструированного поля концентраций выпадения моно- и полидисперсной примеси с соответствующей гео-привязкой (рис. 4). Построенные диаграммы дают наглядное представление полей концентраций примеси в области 10км × 10км вокруг источника загрязнений (в данном случае цементного завода). Максимумы концентраций расположены в северо-восточном секторе, что обусловлено заданной розой ветров. Пространственная динамика изменения концентраций соответствует характеристикам распределений дисперсного состава выбрасываемой примеси.

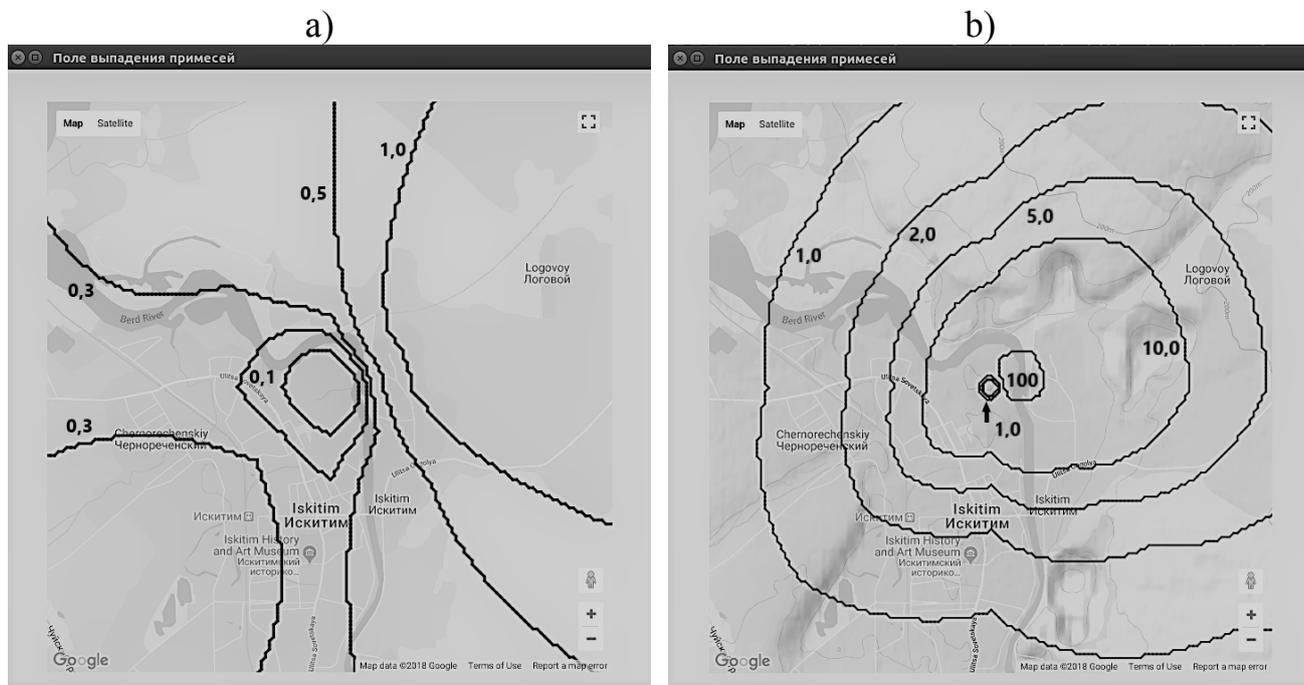


Рис. 4. Численно восстановленные поля выпадений моно- (а) и полидисперсной (б) примеси

В последнем модуле системы на основе восстановленных полей загрязнения производится расчет суммарной оценки выпадений примеси в радиальных, относительно источника, областях (рис. 5).

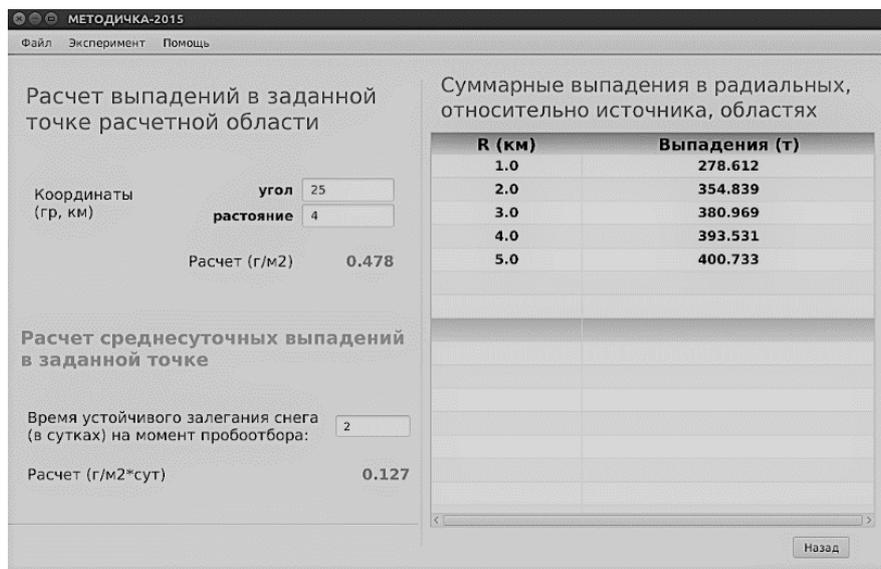


Рис. 5. Оценка выпадений на единицу площади ( $\text{г}/\text{м}^2$ ) и суммарных выпадений примеси (т) по полидисперсной модели

Также в данном модуле реализованы функции расчёта среднесуточных выпадений примеси в указанной точке, положение которой фиксируется в полярных координатах с центром в источнике, а также суммарных выпадений в радиальных областях.

Оценка выпадений примеси на единицу площади позволяет судить о степени соответствия уровней загрязнения санитарно-гигиеническим нормативам. Определение суммарных выпадений создает возможности для внешнего контроля допустимых выбросов предприятия.

### *Заключение*

Разработана геоинформационная система, которая предназначена для численного анализа данных мониторинга в окрестностях точечного источника выбросов моно- и полидисперсной примеси. Система базируется на малопараметрических моделях и методах оценивания полей концентраций. В основу модуля планирования положены численные алгоритмы последовательного анализа и планирования эксперимента. Функции программы позволяют:

- провести реконструкцию полей газового и аэрозольного загрязнения окрестностей источника выбросов вредных примесей;
- получить оценку суммарных выбросов примеси в окрестности источника;
- построить оптимальный план эксперимента: размещение точек отбора проб относительно источника примесей.

Следует отметить, что для корректной работы программы необходим сравнительно небольшой объем данных наблюдений.

Представленная разработка может быть использована для контроля полей концентраций выпадений в окрестности источника и оценивания суммарных выбросов предприятий. Она также может входить в качестве отдельного приложения в методические рекомендации.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-47-540342).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. - М.: Наука, 1982. - 320 с.
2. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. - Л.: Гидрометеиздат, 1991. - 279 с.
3. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 272 с.
4. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе // Утверждены приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273. – 70 с.
5. Щербатов А.Ф., Рапута В.Ф., Турбинский В.В., Ярославцева Т.В. Оценка загрязнения атмосферного воздуха пылью по данным снегосъёмки на основе реконструкции полей выпадений // Анализ риска здоровью. - 2014. - № 2. - С. 42-47.
6. Рапута В.Ф. Модели реконструкции полей длительных выпадений аэрозольных примесей // Оптика атмосферы и океана. - 2007. - Т. 20, № 6. - С. 506-511.
7. Бортникова С.Б., Рапута В.Ф., Девятова А.Ю., Юдахин Ф.Н. Методы анализа данных загрязнения снегового покрова в зонах влияния промышленных предприятий // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2009. - № 5. - С. 447-457.
8. Рапута В.Ф., Шлычков В.А., Леженин А.А., Романов А.Н., Ярославцева Т.В. Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника // Оптика атмосферы и океана. - 2014. - Т. 27, № 08. - С. 713-718.
9. Успенский А.Б., Федоров В.В. Планирование эксперимента в некоторых обратных задачах математической физики // Кибернетика. - 1974. - № 4. - С. 123-128.
10. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. - М.: Наука, 1971. - 312 с.
11. Weaver J., Gao W., Chin S., Iverson D., Vos J. Pro JavaFX 8: A Definitive Guide to Building Desktop, Mobile, and Embedded Java Clients. – 1st ed. – New York: Apress, 2014. – 616 p.
12. Heckler M., Grunwald G., Pereda J., Phillips S. – 2nd ed. - JavaFX 8: Introduction by Example. – New York: Apress, 2014. - 420 p.
13. Crockford D. JavaScript: The Good Parts. – 1st ed. – O'Reilly Media / Yahoo Press, 2008. – 172 p.
14. Pilgrim M. HTML5: Up and Running. – 1st ed. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2010. - 222 p.
15. JAMA: A Java Matrix Package // NIST – National Institute of Standards and Technology URL: <https://math.nist.gov/javanumerics/jama/> (дата обращения: 15.03.2018).
16. Sutton T., Dassau O., Sutton M. A Gentle Introduction to GIS // Documentation QGIS 2.8. 2009. URL: [https://docs.qgis.org/2.8/en/docs/gentle\\_gis\\_introduction/](https://docs.qgis.org/2.8/en/docs/gentle_gis_introduction/) (дата обращения: 03.02.2018)
17. Документация // Google Maps APIs URL: <https://developers.google.com/maps> (дата обращения: 24.01.2018).

© П. А. Амикишицева, Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рапута, 2018

## **ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ФАКЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ИХ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЕДОБЫВАЮЩИЕ ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Мария Николаевна Алексеева*

Институт химии нефти СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 4, кандидат географических наук, младший научный сотрудник лаборатории «Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефти», тел. (3822)49-10-42, e-mail: amn@ipc.tsc.ru

*Ирина Германовна Яценко*

Институт химии нефти СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 4, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лаборатории «Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефти», тел. (3822)49-18-11, e-mail: sric@ipc.tsc.ru

Для выявления действующих факельных установок (ФУ) на месторождениях использовались космические снимки Landsat среднего разрешения зимнего периода, позволяющие с высокой точностью определить местонахождение термоточек, их идентифицировать и определить границы и площади теплового воздействия на территории нефтедобычи. Изложены методические вопросы дистанционного определения местоположения ФУ и определения площади зоны теплового загрязнения в радиусе ее действия.

Проведен анализ изменения площадей зон теплового воздействия по данным термоканалов Landsat 2009, 2016 и 2017 гг. на Лугинецком месторождении. Предложенный подход может быть использован в задаче мониторинга действующих ФУ сжигания попутного нефтяного газа и при оценке экологического состояния территорий нефтяных месторождений.

**Ключевые слова:** тепловые космические снимки, геоинформационные системы, нефтяные месторождения, факельные установки, сжигание попутного нефтяного газа, зоны теплового воздействия.

## **THE DETECTION OF FLARES AND THE DEFINITION OF THEIR ZONES OF THERMAL INFLUENCE OIL ON THE TERRITORY OF TOMSK REGION**

*Maria N. Alexeeva*

Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Prospect Akademichesky St., Tomsk, 634055, Russia, Ph. D., Junior Researcher of Laboratory, tel. (3822)49-10-42, e-mail: amn@ipc.tsc.ru

*Irina G. Yashchenko*

Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Prospect Akademichesky St., Tomsk, 634055, Russia, Ph. D., Head of Laboratory, phone: (3822)49-18-11, e-mail: sric@ipc.tsc.ru

Landsat satellite imagery of the average resolution of the winter period was used to identify the existing flare units in the fields. It helps to accurately locate the points, identify them and determine the boundaries and areas of thermal impact. The methodological issues of remote determination of the location of the flare unit and the determination of the area of the thermal contamination zone within its range are outlined. The analysis of the change in the areas of heat-affected zones was carried out according to the data of thermal channels Landsat 2009, 2016 and 2017 at the Luginetsk deposit. The proposed approach can be used for monitoring of existing flaring units for flaring associated petroleum gas and in assessing the ecological status of oilfields.

**Key words:** thermal satellite images, geoinformation systems, oil fields, flare plants, associated petroleum gas combustion, heat affected zones.

## *Введение*

По данным [1] в Томской области (ТО) основной вклад в загрязнение атмосферы приходится на выбросы предприятий нефтегазодобывающей отрасли (205,58 тыс. т, или 70,1 %). В Томской области ситуация по утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) выглядит значительно хуже по сравнению со среднероссийским уровнем рационального использования ПНГ, который в 2016 г. составил 88,21 %. Так, в 2015 г. на месторождениях Томской области уровень рационального использования ПНГ достиг 85 %. Всего за этот период было добыто 3,6 млрд. м<sup>3</sup>, при этом объем использованного ПНГ составил 3 млрд. м<sup>3</sup>. В 2016 г. объем добываемого ПНГ превысил показатель 2015 г. и составил около 3,75 млрд. м<sup>3</sup>, объем использованного ПНГ снизился и составил всего 2,97 млрд. м<sup>3</sup>, что привело к увеличению объема сожженного газа и в свою очередь к уменьшению доли рациональной утилизации ПНГ до 79 % [1].

На Лугинецком месторождении действует Лугинецкая газокompрессорная станция по переработке ПНГ. Она была построена в 2002 г. и ежегодно перерабатывает 1,4 млрд. м<sup>3</sup> ПНГ Лугинецкого месторождения в отбензиненный газ. «Готовый» газ подается в магистральный газопровод Нижневартовск–Парабель–Кузбасс, являющийся составной частью газотранспортной системы России.

Однако, несмотря на переработку газа, часть его сжигается на ФУ. При сжигании ПНГ в атмосферу выбрасывается большое количество вредных веществ, таких как сажа, оксиды азота, монооксид углерода, бензапирен, бензол, фосген, толуол, тяжелые металлы (ртуть, мышьяк, хром), сернистый ангидрид, иногда сероводород, сероуглерод, меркаптаны, большое количество углекислого газа. Сжигание ПНГ приводит к тепловому загрязнению атмосферы и почвы. Из литературных источников известно [2–4], что в зависимости от высоты ФУ, режима его использования, объема и состава сжигаемого ПНГ зоны термического и химического воздействия ФУ на лесные экосистемы могут быть радиусом от 200 м до 1 км. Применение космических снимков (КС) является актуальным и оправданным в решении проблемы мониторинга действующих ФУ и объемов сжигания ПНГ. В статьях [5–9] рассматриваются вопросы применения КС различного пространственного и спектрального разрешения для детектирования действующих ФУ, как на региональном, так и мировом уровне. Установлено, что официальная статистика по количеству действующих ФУ занижена, поэтому одной из проблем анализа теплового воздействия является определение реального количества функционирующих ФУ. Как нам известно, в Томской области подобных работ ранее не проводилось. Целью данной работы явилась разработка методологии дистанционного обнаружения функционирующих ФУ по данным термоканалов Landsat 8 среднего разрешения и опреде-

ление зон теплового воздействия по изменениям температуры приповерхностного слоя в радиусе их действия.

### **Методы и материалы**

В настоящее время вычисление температуры поверхности Земли с помощью КС является перспективным направлением мониторинга теплового загрязнения [10–23]. Примером может служить анализ повышения температуры урбанизированных территорий, как по сравнению с фоновыми территориями, так и в динамике их застройки со временем [12, 14, 17, 19, 21–23].

Выявление ФУ и зон их теплового воздействия с использованием КС проводится в несколько этапов:

1. С целью обнаружения факельных установок и зон их теплового воздействия КС проходят предварительную обработку с использованием служебных алгоритмов в среде ERDAS Imagine. Предварительная обработка КС включает: 1) исходные значения пикселей изображения 11 спектрального канала пересчитываются из единиц абсолютного излучения (digital number) в значения спектрального излучения; 2) пересчет значений спектрального излучения в значения яркостной температуры по формуле (1) [24]:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273,15, \quad (1)$$

где  $T$  – яркостная температура ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $K_1$  и  $K_2$  – константы термического преобразования из файла метаданных,  $L_\lambda$  – спектральное излучение, вычисляется по формуле:

$$L_\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L, \quad (2)$$

где  $Q_{cal}$  – исходное цифровое значение пикселя,  $M_L$ ,  $A_L$  – коэффициенты из файла метаданных.

2. Выбор пикселей со значениями температур выше других пикселей на КС в среде ArcMap.

3. Для идентификации факельной установки в ArcMap векторное изображение в виде множества термоточек раскладывается на векторные темы – точечная (местоположение ФУ в пикселе с максимальной яркостью в границах месторождения) и полигональная (зона теплового воздействия с радиусом от центрального по яркости пикселя до пикселя, граничащего с фоновой температурой).

4. Присвоение атрибутов – порядковый номер ФУ и название зоны теплового воздействия по названию месторождения. В ArcMap рассчитывается площадь каждой зоны.

Для проверки адекватности дешифрирования снимков температуру пикселей КС сопоставили со значениями температуры приземного слоя атмосферы

фоновой (без теплового загрязнения) территории в районе метеостанции «Средний Васюган» [25] (рис. 1), разница между этими температурами составила всего 2–8 °С. Однако, в границах термоточек с максимальной яркостью температура приповерхностного слоя увеличивается в среднем на 2–16 °С, что является достаточным условием для детектирования действующих ФУ.

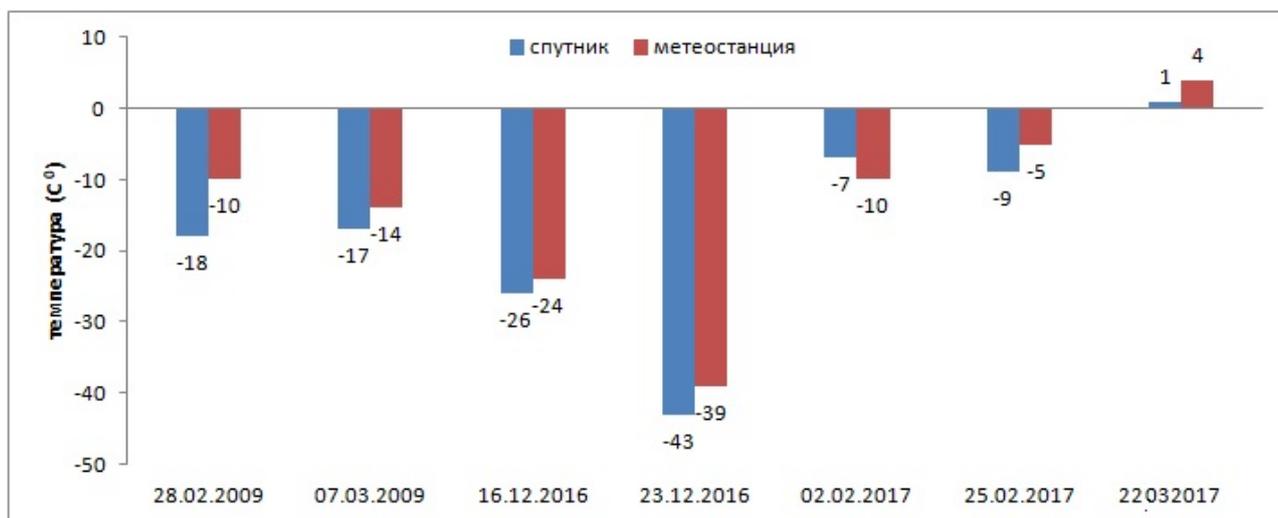


Рис. 1. Температура приповерхностного слоя по спутниковым данным и метеостанции «Средний Васюган» за 2009, 2016, 2017 гг.

### *Результаты и обсуждение*

Применение данной методики позволило идентифицировать 3 ФУ на Лугинецком нефтегазоконденсатном месторождении. Местонахождение данных ФУ подтверждено более детальными КС карты Google [26] и фотографиями (рис. 2).



Рис. 2. Территория Лугинецкого месторождения с интернет-карты [26]

Лугинецкое месторождение среди промыслов «Томскнефти» уникальное. Его главная особенность – многослойность, которая проявляется в сочетании нефти, газа и конденсата. На Лугинецком месторождении начальные извлекаемые запасы нефти – 30324 тыс. т, свободного газа – 49,59 млрд. м<sup>3</sup> и 8430 тыс. т конденсата [27]. Нефти характеризуются высоким содержанием растворенного газа (161,68 м<sup>3</sup>/т) [28, 29]. В 2014 г. на Лугинецком месторождении было добыто 796 тыс. т нефти [30].

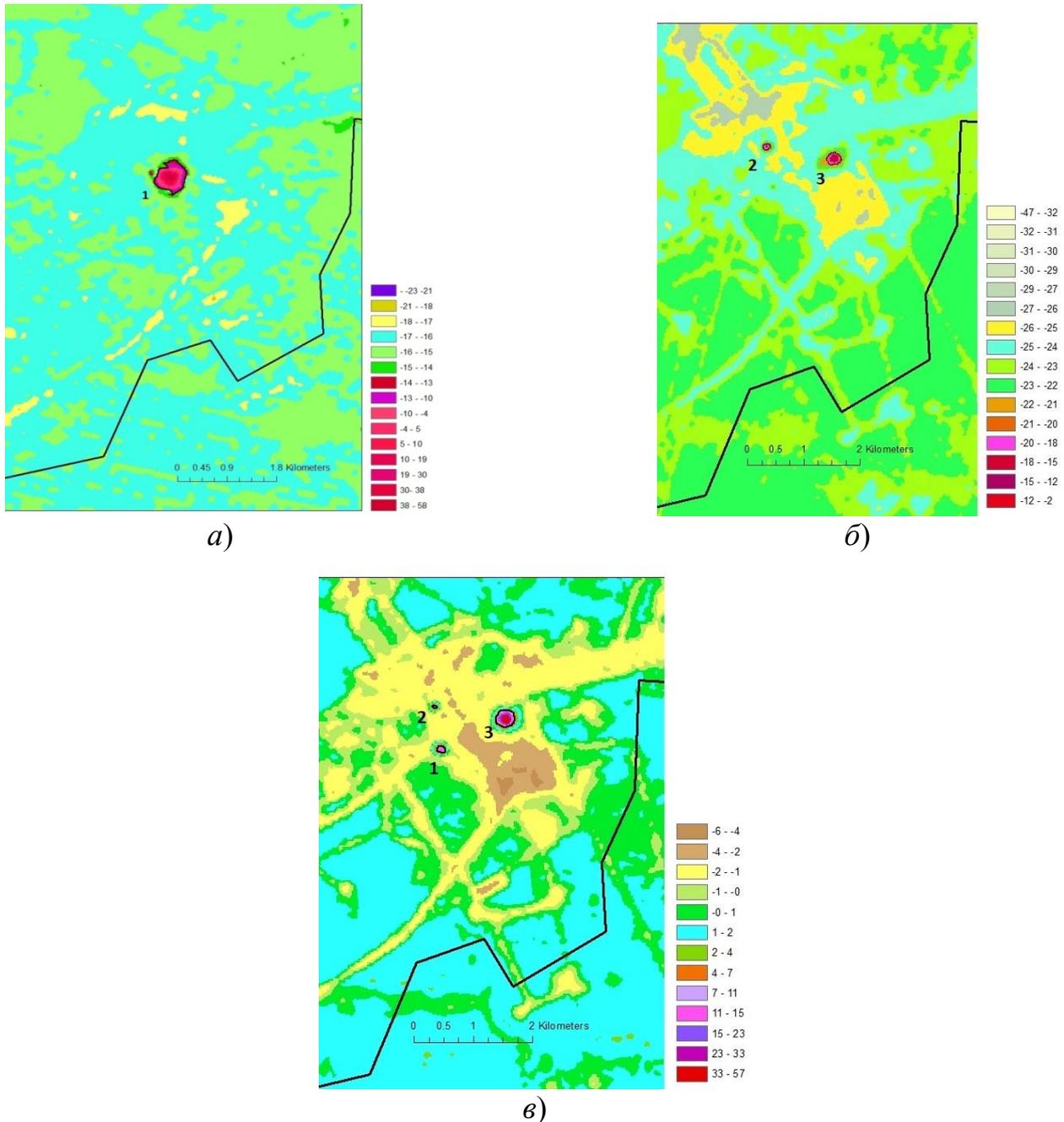


Рис 3. Фрагменты тепловых КС Landsat территории Лугинецкого месторождения с датами съемки:

а) 28.02.2009 г., б) 16.12.2016 г., в) 22.03.2017 г. Действующие ФУ и зоны теплового воздействия обозначены цифрами 1, 2 и 3

Авторами установлено, что на Лугинецком месторождении ФУ функционируют с переменным режимом и мощностью (рис. 3). А именно, на месторождении по КС с датой съемки 28.02.2009 г. обнаружена одна термоточка (рис. 3, а) – действующая ФУ. Для этой термоточки определены границы термического воздействия по разнице температур фоновой территории и зоны повышенной температуры радиусом 300 м. Площадь зоны теплового воздействия составила 0,16 км<sup>2</sup> (обозначена красными тонами на рис. 3а). По данным термоканала температура зоны изменяется от 14 °С (на окраинах) до 59 °С (в центре), что превышает фоновое значение температуры этой территории (-17 °С) в 2–4 раза. На КС 2016 г. наблюдается уже две термоточки (рис. 3, б), ФУ № 1 отсутствует, идентифицированы ФУ № 2 и 3. Суммарная площадь термического загрязнения составила всего 0,02 км<sup>2</sup>, что соответствует уменьшению площади теплового загрязнения в 8 раз по сравнению с 2009 г. В 2017 г. обнаружено уже 3 термоточки (рис. 3, в), суммарная площадь теплового загрязнения равна 0,15 км<sup>2</sup>, что сопоставимо с данными снимка 2009 г. Температуры в термоточках № 1, 2 и 3 равны 14,7 и 57 °С соответственно, что превышает фоновую мартовскую температуру (+2 °С) в 7, 3 и 27 раз соответственно.

Как видно из рис. 3, зоны теплового загрязнения имеют практически круглую форму вследствие невысоких скоростей ветра в указанные даты съемки. Так, по данным метеостанции «Средний Васюган» в эти даты зафиксированы легкие и тихие ветра (1–3 м/с) различных направлений (таблица).

#### Характеристика ветра по данным метеостанции

Метеорологические параметры ветра на высоте 10–12 м над Земной поверхностью		
дата	Направление (румбы)	Скорость ветра (м/с)
28.02.2009	с юго-юго-запада	легкий (3)
07.03.2009	с северо-востока	легкий (2)
16.12.2016	с юга 2 м/с	легкий (2)
23.12.2016	с юго-востока	тихий (1)
02.02.2017	с юго-востока	легкий (2)
25.02.2017	с северо-востока	тихий (1)
22.03.2017	с западо- юго-запада	легкий (3)

#### Заключение

Таким образом, использование указанной методики позволяет оперативно и с достаточной точностью детектировать ФУ, проводить мониторинг их работы и зон теплового воздействия. Так на примере Лугинецкого месторождения показан переменный режим работы факельных установок. В частности, детектирована одна ФУ по состоянию на 28.02.2009, на 16.12.2016 – 2 и 22.03.2017 – 3 ФУ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2016 году» / глав. ред. Ю.В. Лунева, редкол.: Ю.В. Лунева, Н.А. Чатурова; Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области, ОГБУ «Облкомприрода». Ижевск: ООО «Принт-2». - 2017. - 160 с.
2. Евдокимов И.В., Юсупов И.А., Ларионова А.А., Быховец С.С., Глаголев М.В., Шавнин С.А. Тепловое воздействие факела попутного газа на биологическую активность почвы // Почвоведение. - 2017. - № 12. - С.1485-1493.
3. Кирюшин П.А., Книжников А.Ю., Кочи К.В., Пузанова Т.А., Уваров С.А. Попутный нефтяной газ в России: «Сжигать нельзя, перерабатывать!» Аналитический доклад об экономических и экологических издержках сжигания попутного нефтяного газа в России. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF). - 2013. - 88 с.
4. Книжников А.Ю., Ильин А.М. Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF). - 2017. - 32 с.
5. Кочергин Г.А., Куприянов М.А., Полищук Ю.М. Использование космических снимков Landsat 8 для оперативной оценки суммарного объема факельного сжигания попутного газа на нефтедобывающей территории // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2017. - Т. 14. - № 5. - С. 47–55.
6. Мячина К.В. Тепловое загрязнение степных ландшафтов Урало-Заволжья в районах нефтегазодобычи: анализ на основе спутниковых данных // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. - 2017. - Т. 28. - № 5. - С. 44-55.
7. Chowdhury S., Shipman T., Chao D., Elvidge C.D., Zhizhin M, Hsu F. Daytime gas flare detection using Landsat-8 multispectral data // International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). - 2014. - P. 258-261.
8. Elvidge Christopher D. Estimation of Gas Flaring Volumes Using NASA MODIS Fire Detection Products. – Режим доступа: [https://ngdc.noaa.gov/eog/interest/gas\\_flares.html](https://ngdc.noaa.gov/eog/interest/gas_flares.html) (дата обращения: 30.01.2018).
9. Elvidge C.D., Zhizhin M., Baugh K., Hsu F.C., Ghosh T. Methods for Global Survey of Natural Gas Flaring from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Data // Energies. - 2016. - Vol. 9 (1). - P. 14.
10. Avdan, U., Jovanovska, G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data [Электронный ресурс]:/ Journal of Sensors. Vol. 2016 – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/js/2016/1480307/>(дата обращения: 25.03.2018).
11. Ayodeji Ogunode1, Mulemwa Akombelwa1 An algorithm to retrieve Land Surface Temperature using Landsat-8 Dataset [Электронный ресурс]:/ Geomatics Indaba 2017 Special Edition – Режим доступа: <https://www.ajol.info/index.php/sajg/article/view/161377/150945> (дата обращения: 25.03.2018).
12. E. Igun, M. Williams. Impact of urban land cover change on land surface temperature// Global Journal of Environmental Science and Management.-2018.Vol. 4, № 1. - P. 47-58. – Режим доступа: [http://gjesm.net/article\\_27798.html](http://gjesm.net/article_27798.html)(дата обращения: 25.03.2018).
13. Fang Dong1, Jian Chen, Fan Yang1A Study of Land Surface Temperature Retrieval and Thermal Environment Distribution Based on Landsat-8 in Jinan City [Электронный ресурс]:/ 3rd International Conference on Environmental Science and Material Application, ESMA 2017. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/108/4/042008/meta> (дата обращения: 25.03.2018).
14. Hakan Oguz. Automated land surface temperature retrieval from Landsat 8 satellite Imagery: A Case Study Of Diyarbakir – Turkey // Environmental Sustainability and Landscape Management. - 2016. - Vol. 40. - P.598-604.
15. Hu, D., Qiao, K., Wang, X., Zhao, L., Ji, G. Comparison of Three Single-window Algorithms for Retrieving Land-Surface temperature with landsat 8 TIRS Data // Geomatics and Information Science of Wuhan University. - 2017. - Vol. 42. - №7. - P. 869-876.

16. Kun Tan, Zhihong Liao, Peijun Du, Lixin Wu. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 data and validation with geosensor network [Электронный ресурс]:/ Journal of Arid Land 2017. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11707-016-0570-7> (дата обращения: 25.03.2018).
17. Laosuwan, T., Gomasathit, T., Rotjanakusol, T. Application of remote sensing for temperature monitoring: The technique for land surface temperature analysis // Journal of Ecological Engineering. – 2017.-Vol. 18. - № 3. P 53-60.
18. Lei Yang, Yun Gang Cao, Xiao Hua Zhu, Sheng He Zeng, Guo Jiang Yang, Jiang Yong He, Xiu Chun Yang Land surface temperature retrieval for arid regions based on Landsat-8 TIRS data: a case study in Shihezi, Northwest China// Journal of Arid Land.-2014. - Vol 6. - №6. - P. 704–716.
19. Veni, S., George, J., Aravinth, J. Detection of pollution content in an urban area using landsat data // 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, ICACCI 2017. - 2017.- Vol. 2017. - P. 184-190.
20. Wang, Y., Zhou, J., Li, M., Zhang, X. Validation of Landsat-8 TIRS LAND surface temperature retrieved from multiple algorithms in an extremely arid region // International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2016. - Vol. - № 7730809. P. 6934-6937.
21. Wicki, A., Parlow, E. Multiple regression analysis for unmixing of surface temperature data in an urban environment // Remote Sensing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.scopus.com> (дата обращения: 25.03.2018).
22. Xu, C., Qu, J.J., Hao, X., Cosh, M.H., Prueger, J.H., Zhu, Z., Gutenberg, L. Downscaling of surface soil moisture retrieval by combining Landsat/MODIS and in situ measurements // Remote Sensing. – 2018. - № 210/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.scopus.com> (дата обращения: 25.03.2018).
23. Yang, C., He, X., Yu, L., Yang, J., Yan, F., Bu, K.Chang, L., Zhang, S. The cooling effect of urban parks and its monthly variations in a snow climate city Remote Sensing [Электронный ресурс]. - <https://www.scopus.com>
24. Using the USGS Landsat 8 Product: Landsat 8 user guide, United States Geological Survey. – Режим доступа: [http://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php) (дата обращения: 30.01.2018)
25. Архив погоды в Среднем Васюгане [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 25.03.2018).
26. Интернет карта Земной поверхности [Электронный ресурс]:/Googlemaps. – Режим доступа: [http://rerive.com/google\\_map\\_online.html](http://rerive.com/google_map_online.html) (дата обращения: 25.03.2018).
27. Паровинчак К.М., «Обоснование комплексного освоения нефтегазоконденсатных месторождений Томской области»: Дис. на соискание ученой степени канд. г.-м.н.-Томск.-2013.-183 с
28. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Трудноизвлекаемые нефти: физико-химические свойства и закономерности размещения / Под ред. А.А. Новикова. Томск: В-Спектр, 2014. 154 с.
29. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Классификация трудноизвлекаемых нефтей и анализ их качественных свойств //Химия и технология топлив и масел. 2016. № 4 (596). С. 50-56.
30. Слоеный пирог: как добывают "трудную" нефть Лугинецкого месторождения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.riatomsk.ru/article/20150217/dobichanefti-na-lugineckom-mestorozhdenii/>

## REFERENCES

1. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Tomskoy oblasti v 2016 godu». (2017) /glav. red. YU.V. Luneva, redkol.: Yu.V. Luneva, N.A. Chaturova; Departament prirodnikh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Tomskoy oblasti, OGBU «Oblkompriroda». Izhevsk, 160. [in Russian]

2. Yevdokimov I.V., Yusupov I.A., Larionova A.A., Bykhovets S.S., Glagolev M.V., Shavnin S.A. (2017). Teplovoye vozdeystviye fakela poputnogo gaza na biologicheskuyu aktivnost' pochvy. *Pochvovedeniye*, 12, 1485-1493. [in Russian]
3. Kiryushin P.A., Knizhnikov A.Yu., Kochi K.V., Puzanova T.A., Uvarov S.A. (2013). Poputnyy neftyanoy gaz v Rossii: «Szhigat' nel'zya, pererabatyvat'!» Analiticheskiy doklad ob ekonomicheskikh i ekologicheskikh izderzhkakh szhiganiya poputnogo neftyanogo gaza v Rossii. Moscow: Vsemirnyy fond dikoy prirody (WWF), 88. [in Russian]
4. Knizhnikov A.YU., Il'in A.M. (2017) Problemy i perspektivy ispol'zovaniya poputnogo neftyanogo gaza v Rossii. Moscow: Vsemirnyy fond dikoy prirody (WWF), 32 [in Russian]
5. Kochergin G.A., Kupriyanov M.A., Polishchuk Yu.M. (2017) Ispol'zovaniye kosmicheskikh snimkov Landsat 8 dlya operativnoy otsenki summarnogo ob'yema fakel'nogo szhiganiya poputnogo gaza na neftedobyvayushchey territorii. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 14 (5), 47–55. [in Russian]
6. Myachina K.V. Teplovoye zagryazneniye stepnykh landshaftov Uralo-Zavolzh'ya v rayonakh neftegazodobychi: analiz na osnove sputnikovykh dannyykh (2017). *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 28 (5). 44-55. [in Russian]
7. Chowdhury S., Shipman T., Chao D., Elvidge C.D., Zhizhin M., Hsu F. (2014). Daytime gas flare detection using Landsat-8 multispectral data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 258-261.
8. Elvidge Christopher D. (2011) Estimation of Gas Flaring Volumes Using NASA MODIS Fire Detection Products. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [https://ngdc.noaa.gov/eog/interest/gas\\_flares.html](https://ngdc.noaa.gov/eog/interest/gas_flares.html) (data obrashcheniya: 25.03.2018)
9. Elvidge C.D., Zhizhin M., Baugh K., Hsu F.C., Ghosh T. (2016). Methods for Global Survey of Natural Gas Flaring from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Data. *Energies*, 9 (1), 14.
10. Avdan, U., Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data [Elektronnyj resurs]: *Journal of Sensors*. - Rezhim dostupa: <https://www.hindawi.com/journals/js/2016/1480307/> (data obrashcheniya: 25.03.2018).
11. Ayodeji Ogunode1, Mulemwa Akombelwa1. (2017). An algorithm to retrieve Land Surface Temperature using Landsat-8 Dataset [Elektronnyj resurs]: *Geomatics Indaba 2017 Special Edition*.- Rezhim dostupa: <https://www.ajol.info/index.php/sajg/article/view/161377/150945> (data obrashcheniya: 25.03.2018)
12. E. Igun, M. Williams. (2018). Impact of urban land cover change on land surface temperature [Elektronnyj resurs]: *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4 (1), 47-58. - Rezhim dostupa: [http://gjesm.net/article\\_27798.html](http://gjesm.net/article_27798.html) (data obrashcheniya: 25.03.2018).
13. Fang Dong1, Jian Chen, Fan Yang A. (2017). Study of Land Surface Temperature Retrieval and Thermal Environment Distribution Based on Landsat-8 in Jinan City [Elektronnyj resurs]: *3rd International Conference on Environmental Science and Material Application, ESMA 2017*. – Rezhim dostupa: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/108/4/042008/meta> (data obrashcheniya: 25.03.2018).
14. Hakan Oguz. (2016) Automated land surface temperature retrieval from Landsat 8 satellite Imagery: A Case Study Of Diyarbakir – Turkey. *Environmental Sustainability and Landscape Management*, 40, 598-604.
15. Hu, D., Qiao, K., Wang, X., Zhao, L., Ji, G. (2017) Comparison of Three Single-window Algorithms for Retrieving Land-Surface temperature with landsat 8 TIRS Data // *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42 (7), 869-876.
16. Kun Tan, Zhihong Liao, Peijun Du, Lixin Wu. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 data and validation with geosensor network [Elektronnyj resurs]: *Journal of Arid Land* 2017. - Rezhim dostupa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11707-016-0570-7> (data obrashcheniya: 25.03.2018).

17. Laosuwan, T., Gomasathit, T., Rotjanakusol, T. (2017). Application of remote sensing for temperature monitoring: The technique for land surface temperature analysis. *Journal of Ecological Engineering*, 18 (3), 53-60.
18. Lei Yang, Yun Gang Cao, Xiao Hua Zhu, Sheng He Zeng, Guo Jiang Yang, Jiang Yong He, Xiu Chun Yang. (2014). Land surface temperature retrieval for arid regions based on Landsat-8 TIRS data: a case study in Shihezi, Northwest China. *Journal of Arid Land*, 6 (6), 704–716.
19. Veni, S. George, J., Aravinth, J. (2017). Detection of pollution content in an urban area using landsat data // *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, ICACCI*, 184-190.
20. Wang, Y., Zhou, J., Li, M., Zhang, X. (2016). Validation of Landsat-8 TIRS LAND surface temperature retrieved from multiple algorithms in an extremely arid region // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 6934-6937.
21. Wicki, A., Parlow, E. (2017). Multiple regression analysis for unmixing of surface temperature data in an urban environment [Elektronnyj resurs]: *Remote Sensing*. - Rezhim dostupa: <https://www.scopus.com> (data obrashcheniya: 25.03.2018).
22. Xu, C., Qu, J.J., Hao, X., Cosh, M.H., Prueger, J.H., Zhu, Z., Gutenberg, L. (2018) Downscaling of surface soil moisture retrieval by combining Landsat/MODIS and in situ measurements // [Elektronnyj resurs]: *Remote Sensing*. - [Elektronnyj resurs]: [<https://www.scopus.com> (data obrashcheniya: 25.03.2018)].
23. Yang, C., He, X., Yu, L., Yang, J., Yan, F., Bu, K.Chang, L., Zhang, S. T. (2017) The cooling effect of urban parks and its monthly variations in a snow climate city *Remote Sensing* [Электронный ресурс]: – URL: <https://www.scopus.com> (data obrashcheniya: 25.03.2018).
24. Using the USGS Landsat 8 Product: Landsat 8 user guide, United States Geological Survey. URL: [http://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php) (data obrashcheniya: 25.03.2018)
25. Arkhiv\_pogody\_v\_Srednem\_Vasyugane [Elektronnyy resurs]. - Rezhim dostupa: <https://rp5.ru/> (data obrashcheniya: 25.03.2018).
26. Internet karta Zemnoy poverkhnosti [Elektronnyy resurs]: / Googlemaps. - Rezhim dostupa: [http://rerive.com/google\\_map\\_online.html](http://rerive.com/google_map_online.html) (data obrashcheniya: 25.03.2018).
27. Parovinchak K.M. (2013). «Obosnovaniye kompleksnogo osvoyeniya neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy Tomskoy oblasti»: Dis. na soiskaniye uchenoy stepeni kand. g.-m.n. - Tomsk, 183. [in Russian].
28. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. *Trudnoizvlekayemyye nefti: fiziko-khimicheskiye svoystva i zakonomernosti razmeshcheniya*. Tomsk: V-Spektr, 2014. 154 s. [in Russian].
29. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. (2016) Klassifikatsiya trudnoizvlekayemykh neftey i analiz ikh kachestvennykh svoystv. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*, 4 (596), 50-56. [in Russian].
30. Sloyenny pirog: kak dobyvayut «trudnyuyu» nef't' Luginetskogo mestorozhdeniya. (2014). [Elektronnyy resurs]. - Rezhim dostupa: <https://www.riatomsk.ru/article/20150217/dobicha-neftina-lugineckom-mestorozhdenii/> (data obrashcheniya: 25.03.2018).

© М. Н. Алексеева, И. Г. Яценко, 2018

**ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
STATISTICA ДЛЯ АНАЛИЗА БОЛЬШИХ МАССИВОВ ДАННЫХ  
ПО СОДЕРЖАНИЮ КИСЛОРОДА В ВОЗДУХЕ МОСКВЫ  
ЗА ПЕРИОД С 1983 ПО 2012 ГОД**

*Анастасия Викторовна Могильникова*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, студент, тел. (951)384-48-51, e-mail: mogilnikova\_nastya@mail.ru

*Геннадий Павлович Мартынов*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры высшей математики, тел. (383)343-25-77, e-mail: martynov@ssga.ru

В данной статье сначала проводится обзор современной литературы о существенной зависимости здоровья человека от содержания кислорода в среде обитания, обозначаются перспективные гипотезы о положительном влиянии соответствующего уровня кислорода в воздухе на перспективы борьбы с онкологическими заболеваниями. Затем с помощью современного программного обеспечения STATISTICA проводится анализ экспериментальных данных температурного поля и содержания кислорода в воздухе Москвы за период с 1983 г. по 2012 г., которые имеются в свободном доступе. При этом изучаются временные тенденции этих двух факторов среды, изучаются типы распределения статистических данных каждого из этих факторов. Выдвигаются гипотезы о парных зависимостях изучаемых факторов среды, изучаются графики линейной регрессии зависимых факторов и выявляется разброс эмпирических данных относительно этих графиков. По итогам исследований делаются выводы о положительном влиянии повышенного уровня кислорода в воздухе для сохранения здоровья человека и предлагаются рекомендации для жителей Москвы по укреплению своего здоровья в летнее время года.

**Ключевые слова:** STATISTICA, анализ, температура, кислород, здоровье человека, онкология, закон распределения, корреляция, критерий согласия Пирсона, линейная регрессия, диаграмма рассеяния.

**THE USE OF MODERN SOFTWARE STATISTICA FOR ANALYSIS  
OF LARGE DATA SETS ON THE CONTENT OF OXYGEN IN THE AIR  
OF MOSCOW IN THE PERIOD FROM 1983 TO 2012**

*Anastasia V. Mogil'nikova*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Student, phone: (951)384-48-51, e-mail: mogilnikova\_nastya@mail.ru

*Gennadiy P. Martynov*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, phone: (383)343-25-77, e-mail: martynov@ssga.ru

This article first provides an overview of contemporary literature about the dependence of human health on the oxygen content in the environment; indicate promising hypotheses about the positive impact the appropriate level of oxygen in the air at the prospect of fighting cancer. Then,

with the help of modern STATISTICA software, the experimental data on the temperature field and oxygen content in the Moscow air for the period from 1983 to 2012, which are freely available, are analyzed. The time trends of these two environmental factors are studied and the types of distribution of the statistical data of each of these factors are studied. Hypotheses about pair dependences of the studied environmental factors are put forward, graphs of linear regression of dependent factors are studied, and the spread of empirical data on these graphs is revealed. According to the results of research conclusions about positive influence of the increased level of oxygen in air for preservation of health of the person are drawn and recommendations for inhabitants of Moscow on strengthening of the health in a summer time of year are offered.

**Key words:** STATISTICA, analysis, temperature, oxygen, human health, oncology, distribution law, correlation, Pearson agreement criterion, linear regression, scattering diagram.

В 1931 году химик из Германии Отто Варбург получил Нобелевскую премию за результаты исследований связи между содержанием кислорода в клетках организма и развитием рака. Он обнаружил, что ни один болезнетворный вирус, бактерии или грибки не могут жить в присутствии большого количества кислорода. А это означает, что все эти болезнетворные вирусы, бактерии и грибки появляются в тех местах и в тех клетках организма, которые плохо снабжаются кислородом. О. Варбург сформулировал свою гипотезу в лекции [1], которую прочёл на встрече лауреатов Нобелевской премии 30 июня 1966 года в Линдау, Боденское озеро, Германия.

Как специалист в области онкологических заболеваний О. Варбург настаивает, что важнейшей причиной развития рака является дефицит кислорода в организме человека. Этот дефицит приводит к закислению организма, а кислая среда благоприятна для роста раковых клеток, которые отлично функционируют в отсутствии кислорода и не могут выжить в щелочной среде, которая обеспечивается в организме при достаточном уровне кислорода. Поэтому болезни всегда развиваются в тех тканях, где кислорода мало или нет совсем. А нехватка кислорода в атмосфере – это глобальная проблема современности.

В научных трудах Отто Варбурга говорится, что клетки злокачественных новообразований черпают жизненную энергию, проводя в своих митохондриях неокислительную, то есть бескислородную реакцию распада глюкозы. В то время как митохондрии здоровых клеток человеческого организма проводят окислительную реакцию распада. Таким образом, в условиях отсутствия кислорода у клетки есть два выхода: либо погибнуть, либо трансформироваться в злокачественную клетку и начать бесконтрольно размножаться, подобно самостоятельному организму.

Долгие годы теория Варбурга вызывала споры в научном мире. Несколько позднее исследователи обнаружили, что злокачественные изменения внутри клеток и неконтролируемый рост клеток вызывают генетические мутации. Поэтому большинство ученых стало склоняться к тому, что открытие Варбурга демонстрирует лишь побочный эффект, а не причину рака.

И вот совсем недавно исследователи из Бостонского колледжа (Boston College) и Медицинской школы при Вашингтонском университете (Washington

University School of Medicine), США, получили новые доказательства [2] в поддержку теории Отто Варбурга о происхождении рака. Изучив митохондриальные липиды в опухолях разных частей мозга у мышей, американские ученые обнаружили, что основные аномалии кардиолипина (фосфолипид, который является важным компонентом внутренней мембраны митохондрий) имеются во всех типах опухолей и тесно связаны с ослаблением деятельности по выработке энергии. Таким образом, аномалии кардиолипина могут лежать в основе необратимых дыхательных нарушений в клетках опухолей, а это значит, что теория О. Варбурга верна.

В условиях наступления современной цивилизации на окружающую человека среду техногенные загрязнители фиксируются в воздухе и почве не только крупных промышленных центров, но и на сильно удаленных от современных городов территориях. Это неблагоприятное воздействие человека на природу, в частности, проявляется снижением биологического разнообразия [3] на загрязненных территориях.

Методы оценки качества окружающего человека воздуха применяются различные, в частности, хроматографический анализ [4] позволяет узнать о содержании примесей в воздушной среде и оценить риски для человека и других представителей животного и растительного мира.

Знание исходных данных об окружающей нас среде представляет для человека большую ценность, например, при планировании развития экономики на территориях [5], при создании паспортов природных объектов [6], а также при проверке природных систем на устойчивость [7]. Кроме этого, обнаружение различных источников сильного загрязнения среды обитания человека очень важно при оценке экологических параметров [8] территорий и при формировании основ рационального землепользования [9], а также при создании рациональных моделей природопользования [10].

Еще полтора века тому назад люди дышали воздухом, четверть которого представляла собой чистый кислород. В настоящее время воздух больших городов представлен им в среднем на 21%. И с годами проблема будет только усугубляться. Кислородное голодание грозит человечеству общим ухудшением состояния здоровья и снижением сопротивляемости к болезням.

В данной статье с помощью современного программного обеспечения [11] анализируются большие массивы климатических данных: температура воздуха (фактор X) и содержание кислорода в воздухе (фактор Y) по городу Москве [12] за период с 1983 по 2012 годы, исследуются временные тенденции развития данных факторов. Кроме этого, проверяется нормальность распределения этих данных, выявляются некоторые зависимости исследуемых данных между собой, строятся графики линейной регрессии и исследуется разброс данных относительно этих графиков.

Цель данной работы: выявить зависимость между представленными выше выборками друг от друга и оценить меру опасности проживания в таком крупном городе, как Москва.

Первоначально рассмотрим динамику изменения факторов X и Y на указанном временном интервале (с 1983 г. по 2012 год). На рис. 1 представлено изменение фактора X за декабрь. Видно, что средняя температура в декабре месяце в Москве редко становится ниже, чем минус 8 градусов по Цельсию.

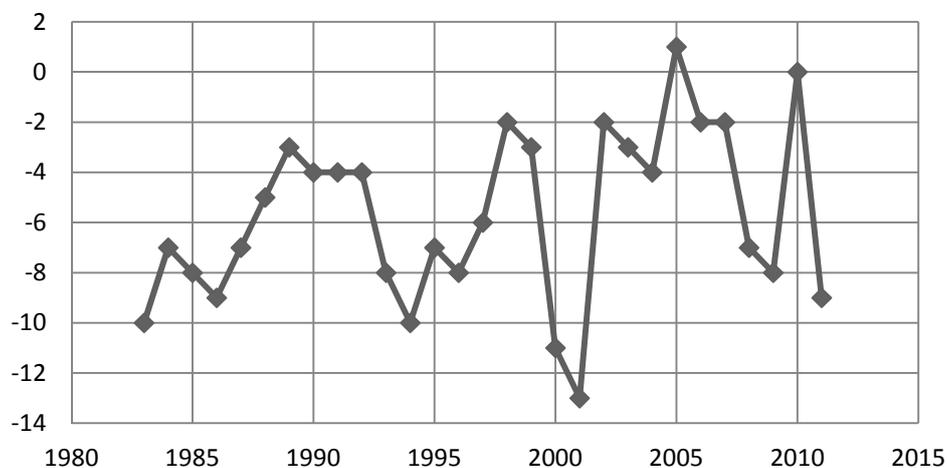


Рис. 1. Динамика по годам фактора X (декабрь)

На рис. 2 изменение фактора Y за декабрь. Видно, что среднее содержание кислорода в воздухе за декабрь месяц в Москве редко становится ниже, чем 300 г/куб.м.

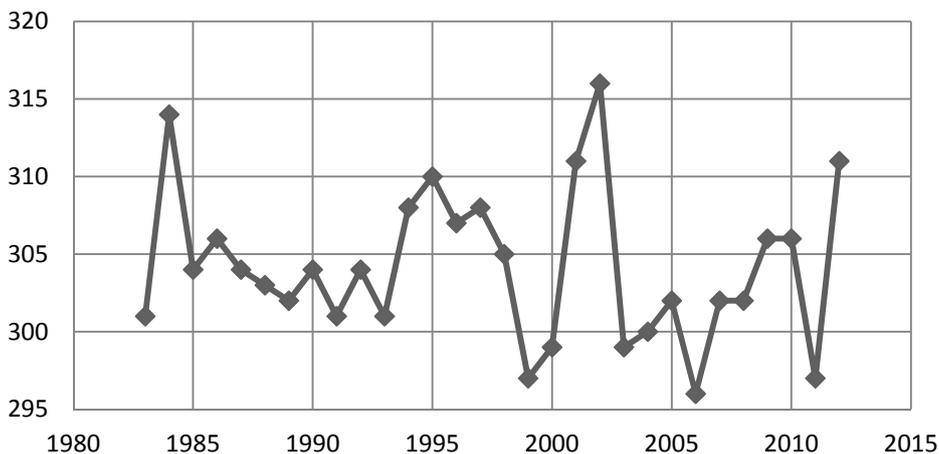


Рис. 2. Динамика по годам фактора Y (декабрь)

Сравнивая рис. 1 и 2 можно заметить, что при увеличении температуры содержание кислорода в воздухе снижается, а также и, наоборот: при понижении температуры содержание кислорода в воздухе увеличивается. Тем самым можно сформулировать первоначальную гипотезу об обратной зависи-

мости факторов X и Y. Для проверки данной гипотезы выяснялось: имеют ли факторы X и Y одинаковый (нормальный) тип распределения. Сначала проводилось визуальное сравнение данных наблюдений с увеличенной кривой Гаусса. На рис. 3 представлены данные наблюдений фактора Y за декабрь, где обнаруживается визуальная «похожесть» распределения данных фактора Y на нормальное распределение.

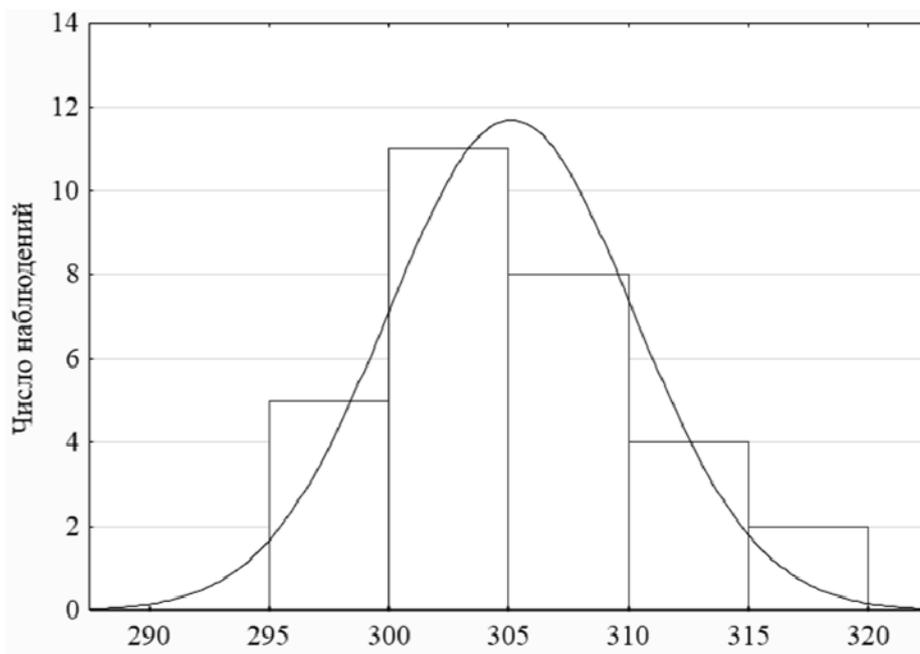


Рис. 3. Фактор Y (декабрь)

Затем каждая из выборок данных проверялась на нормальность распределения по критерию согласия Пирсона. Для проверки распределений на предмет соответствия их к нормальному закону вычисляем выборочную среднюю (математическое ожидание) и выборочное среднеквадратическое отклонение, а затем рассчитываем теоретические частоты. С помощью критерия согласия Пирсона ( $\chi^2$ ) проверяется гипотеза о том, что исследуемые данные распределены по нормальному закону распределения.

В табл. 1 приведены результаты расчетов, согласно которым все выборки факторов X и Y имеют нормальное распределение. Вышеперечисленные расчеты позволяют сделать вывод о том, что распределения рассматриваемых выборок подчиняются нормальному (Гауссовому) закону распределения, что делает возможным использование коэффициента корреляции, который предполагает возможное наличие линейной связи между признаками.

Для выявления зависимости факторов X и Y по средним интервальным данным рассчитывались коэффициенты корреляции парной зависимости. Выборочный парный коэффициент корреляции, найденный по конечному числу статистических данных, практически всегда отличен от нуля, однако не всегда неизвестный парный коэффициент корреляции в генеральной совокупности

также не равен нулю, поэтому корреляционная зависимость обеспечивается достаточным конечным числом статистических данных. Далее были рассмотрены подробно парные зависимости факторов X и Y между собой. В ходе исследования выяснилось, что у факторов X и Y была выявлена сильная обратная зависимость. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 1

Выборки факторов X и Y

Месяц	Фактор X			Фактор Y		
	M	$\sigma$	$\chi^2$	M	$\sigma$	$\chi^2$
I	-6,6	3,5	1,68	305,3	5,6	4,34
II	-7,0	4,0	0,82	306,6	6,7	2,96
III	-1,0	2,4	6,25	300,5	3,7	2,18
IV	7,0	2,1	4,52	292,5	2,5	0,09
V	13,5	2,1	1,1	286,0	2,2	0,83
VI	17,3	2,1	1,85	280,7	1,5	0,95
VII	19,5	2,2	13,9	278,4	1,7	3,01
VIII	17,1	1,6	5,21	280,5	1,5	3,49
IX	11,4	1,7	3,26	286,2	1,5	7,2
X	5,6	1,5	0,57	292,3	1,6	6,03
XI	-1,3	2,9	0,92	299,8	4,5	4,48
XII	-5,6	3,4	1,41	304,2	4,9	2,12

Таблица 2

Статистические данные

Месяц	Коэффициент корреляции	Уравнение линейной регрессии
I	-0,9367	$Y = 295,35 - 1,51X$
II	-0,9484	$Y = 295,39 - 1,6X$
III	-0,7945	$Y = 299,21 - 1,25X$
IV	-0,8529	$Y = 299,61 - 1,02X$
V	-0,8095	$Y = 297,36 - 0,84X$
VI	-0,7834	$Y = 290,43 - 0,57X$
VII	-0,7449	$Y = 289,55 - 0,57X$
VIII	-0,0597	нет
IX	-0,7486	$Y = 293,55 - 0,65X$
X	-0,6055	$Y = 296,0 - 0,66X$
XI	-0,8874	$Y = 298,06 - 1,38X$
XII	-0,9190	$Y = 296,72 - 1,33X$

Во всех перечисленных месяцах (кроме августа) выяснилось, что экспериментальные данные не противоречат гипотезе о зависимости случайных величин X и Y.

Климатические изменения являются результатом комплексного воздействия как антропогенных факторов, связанных с деятельностью человека (например, повышение концентрации  $\text{CO}_2$ ), так и естественных факторов, таких как температура воздуха, содержание кислорода в воздухе и др. По результатам исследований можно утверждать, что от температуры воздуха напрямую зависит содержание кислорода в воздухе. При похолодании он насыщается кислородом, а при потеплении, наоборот, разрежается. Это объясняется тем, что при большей температуре газа скорость молекул увеличивается, и их количество на единицу объема сокращается. Таким образом, с повышением температуры содержание кислорода будет снижаться. Данное утверждение подтверждается диаграммами рассеяния.

На рис. 4 приводится диаграмма рассеяния за декабрь месяц. На диаграмме прослеживаются небольшие отклонения данных наблюдений относительно теоретической линии регрессии факторов  $X$ ,  $Y$ . Аналогичные малые отклонения данных метеорологических наблюдений прослеживаются и диаграммах рассеяния за ноябрь, январь и февраль месяцы, что совпадает с результатами исследований работы [13]. В оставшиеся месяцы года разброс данных наблюдений увеличивается. Это связано, по мнению авторов, с появлением других неучтенных ранее факторов среды (и они проявляются в основном в более теплое время года).

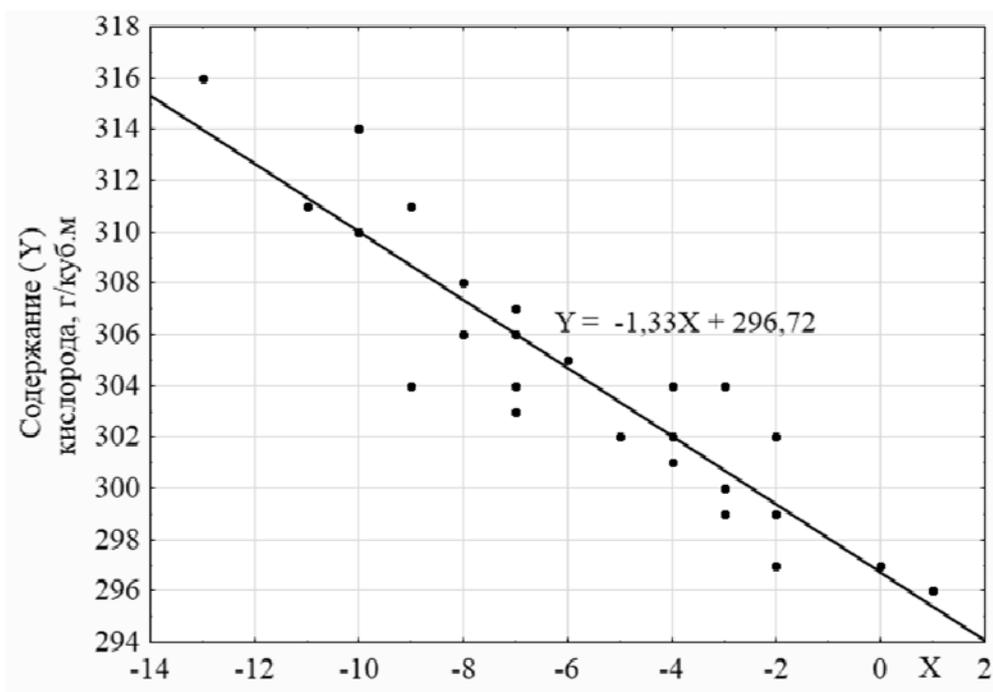


Рис. 4. Диаграмма рассеяния (декабрь)

Исследуя уравнение (рис. 4) парной линейной регрессии для декабря месяца, можно сделать такой прогноз: при увеличении средней температуры декабря, например, на 10 градусов, содержание кислорода в 1 куб. м. воздуха умень-

шится на 13 г. Кроме этого точечного прогноза можно найти доверительные интервалы [14, 15], где с заданной надежностью будет находиться значение интересующего нас фактора  $Y$ , если нам известен диапазон изменения средней температуры  $X$  месяца.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1) программное обеспечение STATISTICA существенно облегчает анализ больших массивов данных, позволяет быстро производить расчеты, строит необходимые рисунки и диаграммы;

2) исследованные два фактора среды распределены, в основном, по нормальному закону распределения;

3) динамика изменения среднемесячных температур в Москве обозначает тенденцию повышения температуры в зимние месяцы;

4) динамика изменения среднемесячного содержания кислорода в воздухе обозначает тенденцию увеличения (более 300 г./куб. м. или около 22% в относительных величинах в расчете на конкретную среднюю температуру месяца;

5) в холодное время года прослеживается устойчивая корреляционная связь содержания кислорода и температуры воздуха: с увеличением температуры содержание кислорода падает, и, наоборот, при понижении температуры содержание кислорода увеличивается (как и в [12]).

6) в теплое время года, учитывая обратную зависимость содержания кислорода от температуры воздуха, рекомендуется больше бывать на природе, либо принимать кислородные коктейли, дабы не допустить кислородного голодания организма;

7) учитывая все выше сказанное, можно сделать вывод, что в Москве жить можно.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Otto Warburg. The prime cause and prevention of cancer with two prefaces on prevention // Revised lecture at the meeting of the Nobel-Laureates on June 30, 1966 at Lindau, Lake Constance, Germany, by Otto Warburg. Director, Max Planck-Institute for Cell Physiology, Berlin-Dahlem. English Edition by Dean Burk. National Cancer Institute, Bethesda, Maryland, USA. The Second Revised Edition Published by Konrad Triltsch, Würzburg, Germany, 1969. / <http://healingtools.tripod.com/primecause2.html>.

2. Stephen M. Hatfield, Jorgen Kjaergaard, Dmitriy Lukashev, Taylor H. Schreiber and others. Immunological mechanisms of the antitumor effects of supplemental oxygenation // *Science Translational Medicine*: – 2015. – Vol. 7, Issue 277, pp. 277ra30. DOI: 10.1126/scitranslmed.aaa1260.

3. Николаева О. Н. Некоторые аспекты создания карт биоразнообразия // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 3. – С. 53–57.

4. Анопченко Л.Ю., А.Ю. Луговская. Использование различных методов для экологического мониторинга атмосферного воздуха // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 84–88.

5. Огулов А. С., Креймер М. А., Турбинский В. В. Значение гигиены атмосферного воздуха в экономическом и территориальном планировании // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 111–128.

6. Зятькова Л. К., Лесных И. В. Геоэкологическая паспортизация природных объектов как инструмент учета и анализа параметров современных геологических процессов // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 114–123.
7. Ряполова Н. Л. Условия формирования ресурсов тепла и влаги как основы функционирования и устойчивости природных систем Западно-Сибирского Севера // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 271–281.
8. Попова Н. Б., Ряполова Н. Л. Оценка эколого-географических параметров ландшафтных провинций Западно-Сибирского севера // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 228–239.
9. Жарников В. Б., Ван А. В. Геоэкологические основы рационального землепользования // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 176–183.
10. Николаева О. Н. Использование картографических моделей природных ресурсов на различных этапах ведения рационального природопользования // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 79–86.
11. Stat Soft STATISTICA / [http://www.statsoft.ru/home/registration/order\\_books.asp](http://www.statsoft.ru/home/registration/order_books.asp).
12. Статистика городов России [Электронный ресурс] / Статистика погоды по годам; ред. Кравцев Л.С. – Режим доступа: <http://www.atlas-yakutia.ru>, свободный.
13. Мартынов Г. П., Анопченко Л. Ю., Богданова Н. С. Статистический анализ некоторых зависимостей климатических данных Новосибирской области за 36 лет // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 57–62.
14. Мартынов Г. П., Луговская А. Ю. О достоверности некоторых статистических оценок в биоиндикационных исследованиях // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 184–188.
15. Редикарцева Е. М., Карпик П. А. Математическое моделирование зависимости уровня воды в реке Оби в городе Новосибирске от сброса воды на Новосибирской ГЭС // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 237–242.

## REFERENCES

1. Otto Warburg (1966). The prime cause and prevention of cancer with two prefaces on prevention / Revised lecture at the meeting of the Nobel-Laureates on June 30, 1966 at Lindau, Lake Constance, Germany, by Otto Warburg. Director, Max Planck-Institute for Cell Physiology, Berlin-Dahlem. English Edition by Dean Burk. National Cancer Institute, Bethesda, Maryland, USA. The Second Revised Edition Published by Konrad Triltsch, Würzburg, Germany, 1969. / <http://healingtools.tripod.com/primecause2.html>
2. Stephen M. Hatfield, Jorgen Kjaergaard, Dmitriy Lukashev, Taylor H. Schreiber and others (2015). Immunological mechanisms of the antitumor effects of supplemental oxygenation // Science Translational Medicine: Vol. 7, Issue 277, pp. 277ra30. DOI: 10.1126/scitranslmed.aaa1260
3. Nikolayeva, O.N. (2015). Some aspects of biodiversity mapping. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geodeziya i aehrofotos"yomka. [News of higher education institutions. Geodesy and aerial photography], 3, 53–57 [in Russian].
4. Anopchenko, L. Y., Lugovskaya, A. Y. (2014). The use of different methods for environmental monitoring of atmospheric air. In Sbornik materialov Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Interekspo GEO-Sibir'-2014. X Mezhdunarodnyj nauchnyj kongress. Vol. 2. «Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya» [Proceedings of International Scientific Conference: Inter-Expo GEO-Siberia-

2014. X international scientific Congress: International scientific conference: Remote sensing methods and photogrammetry, environmental monitoring, Geoecology] (pp. 84–88). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

5. Ogudov, A. S., Kreymer, M. A. & Turbinsky, V. V. (2015). Ecological disaster and emergency planning zones in territory management. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 1(29), 111–128 [in Russian].

6. Zyatkova, L. K., Lesnykh, I. V. (2015). Geological classification of natural objects for taking into account and analysis of current geological processes characteristics. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 2(30), 114–123 [in Russian].

7. Ryapolova, N.L. (2017). The conditions of formation of resources of heat and moisture, as the functioning and sustainability of the natural systems of the west Siberian North. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], Vol. 22, № 2, 271–281 [in Russian].

8. Popova, N.B., Ryapolova, N.L. (2017). Estimation of geographical parameters of landscape provinces in west-north Siberia. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], Vol. 22, № 3, 228–239 [in Russian].

9. Zharnikov, V.B., Van, A.V. (2016). Geo-ecological bases of rational land use. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 4(36), 176–183 [in Russian].

10. Nikolayeva, O.N. (2015). Application of cartographic models of natural resources at different stages of natural resources management. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 3(31), 79–86 [in Russian].

11. Stat Soft STATISTICA / [http://www.statsoft.ru/home/registration/order\\_books.asp](http://www.statsoft.ru/home/registration/order_books.asp).

12. Statistics of the cities of Russia [Electronic resource] / Weather statistics for years; Kravtsev L. S. (Ed.) – Mode of access: <http://www.atlas-yakutia.ru> free.

13. Martynov, G. P., Anopchenko, L. Y. & Bogdanova, N. S. (2017). Statistical analysis of some climatic data dependencies of the Novosibirsk region for 36 years. In Sbornik materialov Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Interekspo GEO-Sibir'-2017. XIII Mezhdunarodnyj nauchnyj kongress. Vol.2. «Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya» [Proceedings of International Scientific Conference: Inter-Expo GEO-Siberia-2017. XIII international scientific Congress: International scientific conference: Remote sensing methods and photogrammetry, environmental monitoring, Geoecology] (pp. 57–62). Novosibirsk: SGUGiT Publ. [in Russian].

14. Martynov, G. P., Lugovskaya, A. Y. (2012). About the reliability of certain statistical estimates in bioindication studies. In Sbornik materialov Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Interekspo GEO-Sibir'-2012. VIII Mezhdunarodnyj nauchnyj kongress. Vol.2. «Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya» [Proceedings of International Scientific Conference: Inter-Expo GEO-Siberia-2012. VIII international scientific Congress: International scientific conference: Remote sensing methods and photogrammetry, environmental monitoring, Geoecology] (pp. 184-188). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

15. Redikarceva, E.M., Karpik, P.A. (2017). Mathematical modeling of the dependence of the water level in the Ob River in Novosibirsk from the water reset at the Novosibirsk hydroelectric power station. Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], Vol. 22, № 4, 237–242 [in Russian].

© А. В. Могильникова, Г. П. Мартынов, 2018

## **ОСОБЕННОСТИ ВОДНОГО РЕЖИМА ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД ЛЕНТОЧНЫХ БОРОВ**

*Сергей Петрович Казьмин*

Западно-Сибирское отделение Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – филиал ФИЦ КНЦ СО РАН, 630082, Россия, г. Новосибирск, ул. Жуковского, 100/1, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (913)797-54-59, e-mail: c\_kazmin@ngs.ru

Анализ режима залегания грунтовых вод в пределах распространения ложбин на Обь-Иртышском междуречье характеризует водный режим почвообразующих пород ленточных боров.

**Ключевые слова:** грунтовые воды, гряда, долина, Кулунда, терраса, пойма.

## **PECULIARITIES OF WATER REGIME OF SOIL-FORMING ROCKS OF BAND STRAINS**

*Sergey P. Kazmin*

West-Siberian Branch of Sukachev Institute of Forest SB RAS – Branch of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center», 100/1, Zhukovsky St., Novosibirsk, 630082, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (913)797-54-59, e-mail: c\_kazmin@ngs.ru

Analysis of the regime of groundwater occurrence within the distribution of troughs on the Ob-Irtysh interfluvial characterizes the water regime of soil-forming rocks of belt burs.

**Key words:** groundwater, ridge, valley, Kulunda, terrace, floodplain.

Ленточные боры – узкие, сильно вытянутые полосы светлохвойного леса шириной от 5 до 10 км простираются в степной зоне крупногрядовой равнины Кулунды, расположенной на юго-востоке Западной Сибири в Обь-Иртышском междуречье. Формации подобного рода являются исключительными на планете. Название ленточных боров созвучно с названиями небольших рек, протекающих по ним: Барнаулки, Касмалы, Кулунды, Бурлы. Все они параллельны друг другу и направлены с СВ на ЮЗ. Самым крупным является Барнаульский ленточный бор, шириной от 8 до 10 км, протянувшийся на 550 км. Барнаульский и Касмалинский лесные массивы сливаются воедино, образуя единый Гатский бор шириной 45 км.

Кулунда является уникальным районом Северного полушария Земли. Только в умеренном поясе Южного полушария в Австралии есть регион, близкий по геологическому строению к Кулунде. Огромные размеры крупных форм (гряд или увалов) Кулунды и простирающиеся их межгрядовых понижений (ложбин) вытянутых прямолинейно в СВ направлении длиной до 300 км и шириной до 5-15 км просматриваются на космоснимках любого масштаба. Отмечается закономерное снижение отметок гребневых поверхностей увалов по мере чередования с юга на север. Увалы довольно просты в устройстве поверхности. Они представляют собой правильные валы, в морфологии каждого

из которых чётко разграничиваются верхняя или гребневая часть гряд, их склоны и ложбины, сопрягающие между собой эти валы. В ложбинах развита плоско-волнистая, реже полого-грядовая поверхность. Местные мелкие реки, проходящие по их дну, кроме повсеместно узкой, но ясно выраженной поймы, имеют первую террасу. К межгрядовым понижениям или древним ложбинам приурочены ленточные боры [1].

Для получения реальных представлений о формировании крупногрядовой поверхности Кулунды важное значение имеет изучение строения и условий залегания отложений, слагающих основные формы рельефа. Именно формирование осадков отражает специфику и динамику природных процессов времени их накопления. В настоящее время выяснилось, что крупногрядовая Кулунда имеет субаэральный генезис, преимущественно эоловое происхождение и формировалась на протяжении конца палеомагнитной эпохи Матуяма и всей эпохи Брюнес в четвертичном периоде (квартере) под влиянием резких колебаний климата. Вся толща отложений гряд, включая и межгрядовые ложбины, возвышается над современным дном долины Оби. Она в целом образовалась в результате неравномерного накопления взвешенного эолового наноса, поступавшего с ЮЗ в эпохи аридизации [2].

Мнения исследователей о влиянии тектоники палеозойского фундамента, мезозойско-кайнозойских структур на ориентировку ложбин и увалов, а также роли тектонических процессов в заложении речных систем не подтверждается данными бурения. Дифференциация ложбин и увалов на отрицательные и положительные морфоструктуры бурением картировочных скважин в процессе проведения геологосъёмочных работ не выявлена. Таким образом образование ложбин не связано с водными и тектоническими процессами.

Сильнее всего процессы дефляции (выдувания) происходили в понижениях. Накопление грубого материала в виде песка, выносившегося ветрами, происходило вблизи котловин выдувания. В результате на поверхности ложбин был образован бугристо-грядовый рельеф, представленный чередованием песчаных грив (гряд), бугров и дюн, разделёнными узкими лощинами, впадинами и западинами. Ориентировка данных элементов направлена так же, как и ложбин, в СВ направлении. К СВ происходит постепенное сгущение гряд, в настоящее время закреплённые сосновыми борами и слившие в ленточные боровые массивы с характерной СВ ориентировкой, хорошо отмечаемой и на мелкомасштабных космоснимках.

Долины местных речек в современном виде на Обь-Иртышском междуречье возникли в ранний и поздний этапы обильного обводнения и совпадали с похолоданием позднеледниковья, что указывает на крайнюю их молодость. Современная пойма фактически всюду приурочена ко дну русел заключительного этапа формирования первой речной террасы. Таким образом современная гидросеть имеет в основном вторичное происхождение по отношению к эоловой крупногрядовой поверхности.

На остальной территории межгрядовых понижений, где речные, биогенные и озёрные процессы не проявлялись, шло формирование современного почвен-

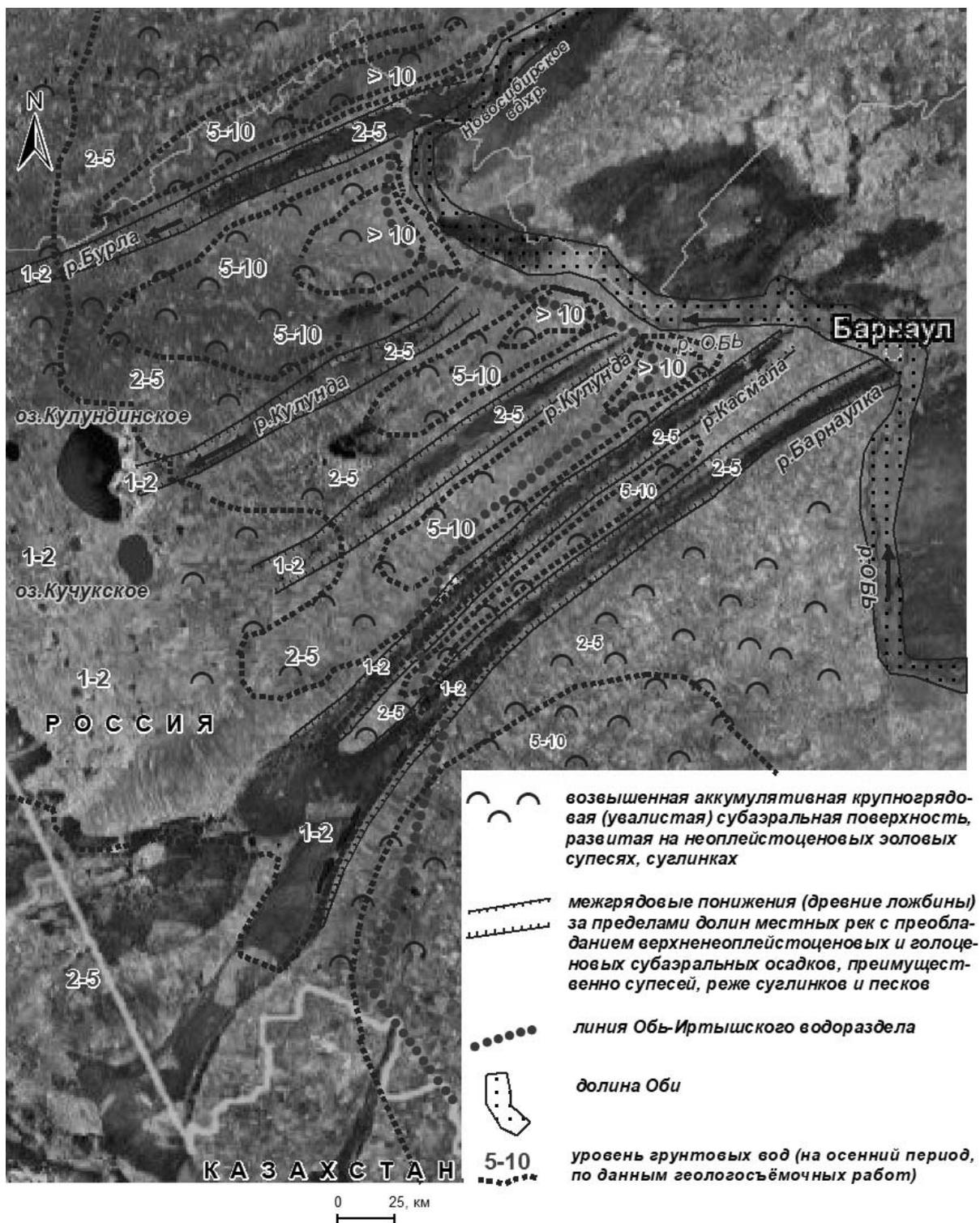
ного покрова. Постепенно ложбины, разделяющие увалы, заросли неприхотливой сосной, превратившись в массивы реликтовых ленточных боров, а пространство между ними на возвышенных увалистых поверхностях местных междуречий степной растительностью.

Установлено, что толща субаэральных отложений имеет цикличное или ритмичное строение. Характерной особенностью является наличие в разрезах последовательно налегающих друг на друга однообразно построенных осадков (циклитов или ритмопачек). В толще содержатся многократно чередующиеся покровы лёссовых отложений, ископаемые почвы и горизонты проявления мерзлотно-солифлюкционных процессов. Это наиболее важная черта структуры субаэральной формации. Почвообразующими для современных почв служат породы, а местами и древние гумусовые горизонты разных ритмопачек. Это создает разнообразие условий почвообразования и многообразие почв.

Под гумусированным горизонтом современных почв залегают субаэральные сартанские (ельцовские) осадки. Преобладают лессовидные суглинки и супеси, пески, образующие в целом покров лессовых отложений. Бурением скважин глубиной до 15-20 м в разрезах под современными почвами выявлено до четырех маломощных (0,5-1,0 м) почвенных горизонтов, разделяющие лессовидные отложения на пачки мощностью до 3-5 м. В верхней части разреза ближе, к поверхности породы находятся в рыхлом неуплотнённом состоянии. Есть вертикальные трещины и макропоры. В средней части они постепенно переходят в уплотненное (деградированное) и в нижней части, если породы не увлажнены, в крепкое камнеподобное состояние.

Исследование свойств покрова лессовых отложений и ископаемых почв показывает, что эти образования обладают различными особенностями состава, структуры и текстуры. Погребенные почвы характеризуются относительно высоким содержанием глинистой фракции, сравнительно низким содержанием пылеватых частиц, кварца, пониженной пористостью, повышенной водопрочностью, ясно выраженной структурой. Именно от условий и характера залегания, мощности и состава этого водоупорного горизонта зависит в первую очередь глубина залегания грунтовых вод.

Грунтовые воды, приуроченные к покрову лёссовых отложений, близко залегают к поверхности (менее 3 м) в районах относительно выположенного рельефа и неглубокого залегания выдержанного по простиранию водоупорного слоя, представленного горизонтом погребенных почв (рисунок). При увеличении уклона склона увеличиваются углы уклонов горизонта погребенных почв и ввиду проявления древних эрозионных и флювиальных (водных) процессов происходит уменьшение его мощности, а в некоторых местах и полное выклинивание из разреза водоупорного слоя. В результате создаются благоприятные условия для подземного стока грунтовых вод, а в местах отсутствия водоупорных слоев, и перетока в нижележащие водоносные слои более древней ритмопачки [3].



### Глубина залегания грунтовых вод в степной зоне крупногрядовой Кулундинской равнины Обь-Иртышского междуречья

Проведенные исследования показали, что основными естественными факторами, благоприятствующими созданию условий для обводнения субэкральных образований, являются уклон рельефа, обуславливающий дренируемость территории и, кроме того, это глубина, мощность и условия залегания горизон-

та погребенных почв, обладающего более водопрочными свойствами по сравнению с вышележащим покровом лессовых отложений.

Слабая дренированность и близкое горизонтальное залегание водоупоров к поверхности способствует образованию озёр. В юго-западной части региона насчитывается много соленых и горько-соленых озер. Засушливые климатические условия южной части сказались в уменьшении обводненности территории. В борах Казахстана почти нет водотоков и значительно реже встречаются озера, большей частью горько-соленые.

Грунтовые воды в борах находятся на разной глубине в зависимости от относительной высоты местности. В межбугровых понижениях юго-западной части боров они залегают близко и часто выходят на поверхность. В южной и средней частях Касмалинской и Барнаульской ленточных боров, а также в Гатском бору их глубина залегания составляет 1-2 м. В остальной части этих лент и Кулундинской и Бурлинской ленточных боров зеркало грунтовых вод опущено на глубину 2-5 м.

В течение года уровни грунтовых вод меняются в зависимости от влажности года и сезонов и от геоморфологического положения точки наблюдения. На водораздельных поверхностях амплитуда колебания уровня грунтовых вод в сухой год составляет 0,2-0,8 м, во влажный – 1,0-2,5 м. В долинах рек амплитуда колебания уровня грунтовых вод в течение года зависит от подъёма воды в реке и от удаленности от неё. На склонах, сложенных однородными породами, амплитуда колебания уровня грунтовых вод минимальная.

Таким образом, обводненность почвообразующих пород зависит от водности и сезонов года, от литологического строения толщи пород зоны аэрации. На плоских ровных поверхностях водоразделов формируется постоянный водоносный горизонт на кровле предыдущей ритмопачки, имеющей тяжелый состав и тугопластичную консистенцию. На склоне, где верхние ритмопачки дренированы, в зону аэрации входят разные литологические слои. Прослойки пород более тяжелого грансостава образуют локальные водоупоры в зоне аэрации. На них весной задерживается снеготалая вода, образуя верховодку. Во влажные годы верховодка может существовать несколько лет со своей амплитудой колебания уровня воды.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казьмин С. П. Генезис древних ложбин Обь-Иртышского междуречья // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 224–229.

2. Казьмин С. П. Гидрогеологические особенности покровных субаэральных отложений на юге Западной Сибири // Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований / Материалы VI Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода, Новосибирск, 19-23 октября 2009 г. – Новосибирск, 2009. – С. 249–251.

3. Казьмин С. П. Геоморфология Восточной Кулунды и Барабы. – Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН. – 1997. – 46 с.

© С. П. Казьмин, 2018

## **ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗИМНИХ И ЗЕЛЕННЫХ ЧЕРЕНКОВ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ПРИВИТЫХ КРУПНОМЕРНЫХ САЖЕНЦЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ**

*Юрий Никандрович Ильичев*

Западно-Сибирское отделение Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – филиал ФИЦ КНЦ СО РАН, 630082, Россия, г. Новосибирск, ул. Жуковского, 100/1, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, тел. (383)227-33-30, e-mail: yu.ilyichev2015@yandex.ru

В статье обсуждается перспектива использования зимних и зеленых черенков при выращивании привитых крупномерных саженцев сосны для лесовосстановления вырубок по гарям. Отмечается хорошая приживаемость прививок разными черенками.

**Ключевые слова:** черенки зеленые и зимние, прививки, приживаемость, перспектива.

## **ASSESSMENT OF PROSPECT OF USE OF WINTER AND GREEN SHANKS FOR CULTIVATION OF THE IMPARTED LARGE SAPPLINGS OF PINUS SYLVESTRIS L.**

*Yuriy N. Ilichev*

West-Siberian Branch of Sukachev Institute of Forest SB RAS – Branch of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center», 100/1, Zhukovsky St., Novosibirsk, 630082, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)227-33-30, e-mail: yu.ilyichev2015@yandex.ru

In article the prospect of use of winter and green shanks at cultivation of the imparted large sapplings of a pine for reforestation on cuttings down in burned areas. Good survival of inoculations is noted by different shanks.

**Key words:** shanks winter and green, inoculations, survival, prospect.

С 30-х годов 20в. в СССР были введены концентрированные рубки леса, которые привели к появлению большого количества обезлесенных участков [6]. Поэтому теперь одной из важнейших задач лесного хозяйства России является лесовосстановление вырубок. В решении этого вопроса наиболее сложным оказалось облесение крупных вырубок по гарям с отсутствием источников обсеменения и быстро развивающимся на них мощным травяным покровом, особенно на месте разнотравных типов леса. Создание на таких вырубках лесных культур 2- летними саженцами оказалось неэффективным [3]. Не нашли широкого применения и рекомендации по созданию на этих вырубках сплошных лесных культур крупномерными 4-6 – летними саженцами ввиду их значительного удорожания [1;2 и др.]. Некоторые исследователи считают, что в настоящее время лесхозы (лесничества) совместно с отраслевыми и академическими научно-исследовательскими центрами должны вести поиск новых технологий ведения лесного хозяйства [7].

В связи с этим в 2010 году Западно-Сибирским отделением Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН были начаты исследования по поиску новых спосо-

бов лесовосстановления вырубок по гарям, которые продолжаются по настоящее время. Разработана технология лесовосстановления вырубок методом посадки не сплошных, а обсеменительных культур привитыми от плюсовых деревьев шести-семи - летними саженцами, которые высаживаются по схеме лесосеменных плантаций и которые через 4-5 лет будут выполнять роль семенников [4; 5]. Метод апробирован в опытно-производственных условиях. По эколого-лесоводственным показателям метод отвечает предъявляемым требованиям: приживаемость саженцев на опытных участках составила 95-97%; годовые приросты у саженцев в «школе» и высаженных на плантацию сопоставимы; на 5-й год у 10% саженцев сформировались шишки, то есть предложенный метод успешно может применяться на практике. В процессе апробации метода было выявлено, что значительное количество прививок повреждается лосем [9]. Поэтому при производственном применении метода потребуются решить две задачи: 1) защитить саженцы на плантациях от лося (в европейских странах это достигается применением отпугивающих репеллентов); 2) систематически получать значительное количество привитых саженцев, необходимых для облесения новых и ремонта уже засаженных вырубок.

Для решения 2-й задачи – получения необходимого количества привитых саженцев - были проведены исследования по оценке перспективы использования зимних и зеленых черенков для прививки в лесостепном Приобье.

Исследования проводились в Ларичихинском лесничестве Алтайского края на полигоне подвойных культур, заложенном нами в 2013 году в Курочкинском участковом лесничестве. Для прививки использовались зимние черенки с прививочных плодоносящих лесосеменных плантаций и летние черенки с архива клонов.

Методика исследований включала 2 периода: камеральный и полевой. В камеральный период на основе анализа картографических материалов и материалов учета урожайности на схемах плантаций выделялись наиболее урожайные клоны, в результате чего было намечено 18 клонов, перспективных для заготовки черенков. В архиве клонов, ввиду его малочисленности, летние черенки заготавливались со всех клонов. В полевой период до начала сокодвижения (первая декада апреля) намеченные клоны отыскивались на плантациях, с которых из верхней части кроны с помощью специального секатора заготавливались черенки. Ветви длиной 20-30см увязывались в пучки, маркировались в соответствии с клонами, в мешках доставлялись к месту работы. До начала прививок черенки хранились в снежнике. Летние черенки заготавливались непосредственно перед прививкой. Перед прививкой проводилась сортировка черенков, отбирались наиболее толстые приросты последнего года. Прививка зимних черенков на подвои проводилась весной (начало мая), перед тем, как почки на центральном побеге подвоев начинали трогаться в рост. Летние черенки прививались в конце июля. Прививки выполнялись по методике, разработанной Е.П. Проказиным [8] методом «в приклад сердцевинной на камбий», который оказался наиболее перспективным для клонирования хвойных древесных пород. В процессе эксперимента было привито от 18 клонов 679 зимних

и от 8 клонов 290 летних черенков. Перспектива использования зимних и летних черенков для прививок в условиях лесостепной зоны определялась методом оценки приживаемости и сохранности разных прививок в течение вегетационного периода, анализа основных морфологических признаков - толщины диаметров подвоя и привоя и прироста прививок, влияющих на их приживаемость и показывающих их физиологическое состояние. Результаты приживаемости и сохранности весенних прививок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка приживаемости весенних прививок по летнему и осеннему учетам и общей сохранности живых прививок за вегетационный период 2016 г.

Номер клонов	По летнему учету (июль)			По осеннему учету (октябрь)			Сохранность прививок, %
	всего, шт.	живых, шт.	приживаемость, %	всего, шт.	живых, шт.	приживаемость, %	
502	36	35	97,2	36	35	97,2	97,2
22	40	37	92,5	34	30	88,2	75,0
269	25	23	92,0	25	23	92,0	92,0
514	30	26	86,7	28	26	92,8	86,7
501	29	25	86,2	21	17	80,9	58,6
19	32	27	84,4	29	20	68,9	62,5
513	58	48	82,8	52	50	96,1	86,2
278	28	23	82,1	24	23	95,8	82,1
32	27	22	81,5	25	23	92,0	85,2
272	47	37	78,7	41	35	85,3	74,5
276	29	22	75,9	23	21	91,3	72,4
73	29	22	75,9	26	18	69,2	62,1
194	48	34	70,8	42	27	64,2	56,2
510	49	34	69,4	39	35	89,7	71,4
204	26	17	65,4	24	17	70,8	65,4
16	27	17	63,0	19	16	84,2	59,3
506	74	43	58,1	58	34	58,6	45,9
279	45	22	48,9	24	19	66,6	42,2
шт,	679	514	средняя	570	470	средняя	средняя
%	100	75,7	75,7	100	82,4	82,4	69,2

Из табл. 1 видно, что с начала мая по конец июля от общего количества привитых весной саженцев погибло 165 прививок или около 25%. Приживаемость по клонам колеблется значительно, от 48,9% до 97,2%. Очевидно, это связано с морфологическими особенностями крон деревьев, толщиной скелетных ветвей и их годовых приростов, которые генетически детерминированы. Это указывает на то, что при заготовке черенков нужно обращать внимание не только на урожайность дерева, но и на толщину годовых приростов, так как тонкие черенки, как показал анализ, приживаются значительно хуже. Средняя приживаемость по летнему учёту 75,7%. Во второй половине вегетационного периода, с конца июля по начало октября, погибло только 17,6% прививок, что

значительно меньше. Разница в приживаемости прививок вызвана климатическими факторами ввиду того, что весенне-летний период в зоне лесостепи характеризуется жаркой и часто сухой погодой, что естественно отрицательно влияет на приживаемость прививок. В результате этого приживаемость прививок по осеннему учету оказалась выше и составила 82,4%. Средняя сохранность весенних прививок в целом за вегетационный период составила около 70%, то есть достаточно хорошая.

Сведения о приживаемости летних прививок приведены в табл. 2.

Таблица 2

Приживаемость и сохранность летних прививок в "школе"  
по данным осеннего учета

Номера клонов	Всего прививок, шт.	Живых, шт.	Погибших прививок, шт.	Состояние прививок	Приживаемость, %
1	2	3	4	6	7
194	31	27	4	хор.	87,1
267	43	40	3	хор.	93,0
269	47	46	1	хор.	97,9
19	32	26	6	уд.	81,2
204	10	7	3	уд.	70,0
510	36	34	2	хор.	94,4
353	57	51	6	хор.	89,5
506	34	31	3	хор.	91,2
Итого: шт %	290 100	262 90,3	28 9,7		среднее 90,3

Видно, что приживаемость летних прививок на начало октября оказалась значительно больше, чем у весенних прививок, однако ввиду короткого летнего периода приживаемости её следует рассматривать как предварительную. Фактическую приживаемость летних прививок можно будет оценить после перезимовки, когда прививки тронутся в рост.

Показатели диаметров подвоя, привоя и прироста прививок, влияющих на приживаемость, состояние прививок приведены в табл. 3.

Из таблицы видно, что у летних прививок по величине диаметры привоя и подвоя достаточно близки, что и отразилось на их большей приживаемости. У весенних прививок диаметры черенков значительно тоньше диаметров подвоя, что отразилось на меньшей приживаемости весенних прививок.

Выполненные исследования позволяют констатировать следующее.

В зоне лесостепных Приобских боров для выращивания привитых саженцев могут успешно использоваться зимние и летние черенки. Прививки хорошо приживаются.

Для повышения приживаемости необходимо: под заготовку черенков отбирать деревья с более толстыми годичными приростами; своевременно проводить уход за прививками; повышать мастерство прививальщиков.

## Средние статистические показатели прививок по осеннему учету

Количество клонов	Статистические показатели	Возраст, лет	Высота подвоя, см	Диаметр подвоя, см	Диаметр привоя, см	Прирост, см
Летние прививки						
3	Среднее и её ошибка ( $M \pm m$ )	3,7±0,11	60,43±2,58	0,63±0,01	0,48±0,01	--
	Коэффициент вариации ( $C_v$ )	23,5	33,1	18,5	22,01	22,01
Весенние прививки						
7	Среднее и её ошибка ( $M \pm m$ )	3,51±0,12	60,43±2,58	1,05±0,04	0,63±0,02	2,83±0,16
	Коэффициент вариации ( $C_v$ )	43,1	33,1	48,05	49,1	69,6

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бирюкова А. М., Ряховский И. М., Фрейберг И. А. Создание культур сосны и ели крупномерным посадочным материалом // Лесное хозяйство. – 1983. – № 7. – С. 53–54.
2. Буторова О. Ф. Применение крупномерного посадочного материала для ускорения лесовосстановления // Проблемы лесовосстановления в таежной зоне СССР: тез. докл. всесоюз. конф., Красноярск, 13-15 сентября 1989. – Красноярск, 1989. – С. 38–40.
3. Ильичев Ю. Н., Бушков Н. Т., Маскаев В. И. Лесовозобновление на вырубках по гарям Приобских боров лесостепной зоны – Новосибирск: Наука, 2009. – 257 с.
4. Ильичев Ю. Н. Обоснование и экспериментальная отработка нового метода лесовосстановления на вырубках с отсутствием источников обсеменения // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 3, ч. 2. – С. 169–172.
5. Ильичев Ю. Н. Опыт закладки плантационно-обсеменительных культур сосны на вырубках по гарям // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 4. – С. 42–45.
6. Мелехов И.С. Изучение концентрированных рубок и возобновление леса в связи с ними в таежной зоне // Концентрированные рубки в лесах севера: сб. статей. Изд-во АН СССР : М., 1954. – С. 5–29.
7. Писаренко А.И. Какие лесхозы нужны России // Лесное хозяйство.–2006.–№ 1.- 6-9.
8. Проказин Е.П. Новый метод прививки хвойных для создания лесосеменных участков // Лесное хозяйство. – 1960. – № 5. – С. 22–29.
9. Тараканов В.В., Ильичев Ю.Н., Бушков Н. Т. Плантационно-обсеменительные культуры – новый метод восстановления хвойных лесов на крупных гарях // Сибирский лесной журнал. – 2014. – № 1. – С. 104–109.

## О ВОСПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕСОВ В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ

*Владимир Алексеевич Соколов*

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, 50/28, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, тел. (391)249-46-35, e-mail: sokolovva@ksc.krasn.ru

*Елена Владимировна Горяева*

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, 50/28, кандидат сельскохозяйственных наук, тел. (391)249-46-35, e-mail: gor-elka@yandex.ru

В соответствии с задачами Концепции интенсификации использования и воспроизводства лесов, предложенной МПР России, должны быть определены территории для ведения интенсивного лесопользования и воспроизводства лесов. Основной причиной неудовлетворительного воспроизводства лесов является недостаточность финансирования работ. Фактические затраты на создание 1 га лесных культур не превышают 10–15 тыс. руб. Чтобы добиться удовлетворительной сохранности лесных культур с последующим перевод их в покрытые лесом земли, необходимо повысить затраты на создание 1 га лесных культур минимум до 45–52 тыс. руб. Кроме того, после их перевода необходимо проведение 2–3-кратного лесоводственного ухода с дополнительными затратами. Эта проблема неразрывно связана с повышением доходности лесного хозяйства как отрасли материального производства. Если не решить эту проблему, то реализация Концепции интенсификации использования и воспроизводства лесов ограничится декларативными призывами к переходу на интенсивную модель развития.

**Ключевые слова:** воспроизводство лесов, лесные культуры, фонд лесовосстановления, интенсификация, финансирование работ, Красноярский край, лесоводственные уходы.

## ON FOREST REGENERATION IN THE KRASNOYARSK REGION

*Vladimir A. Sokolov*

V. N. Sukachev Institute of Forest Russian Academy of Science Siberian Branch, 50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia, D. Sc., Professor, phone: (391)249-46-35, e-mail: sokolovva@ksc.krasn.ru

*Elena V. Goryaeva*

V. N. Sukachev Institute of Forest Russian Academy of Science Siberian Branch, 50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia, Ph. D., phone: (391)249-46-35, e-mail: gor-elka@yandex.ru

In accordance with the goals of the Concept for forest use and forest regeneration intensification, suggested by the Russian Ministry of Nature Resources, areas of intense forest use and forest regeneration should be identified. Key reason of insufficient forest regeneration is a lack of funding. Actual costs of forest plantation development with an area of 1 ha do not exceed 10-15 th. rubles. To have sufficient forest plantations for their further transformation in areas covered by forest, it is necessary to increase costs of forest plantation development with an area of 1 ha to the level of 45-52 th. rubles. Moreover, 2-3-times of forest tending operations should be carried out after transformation the forest plantations in areas covered by forest. There will be extra costs. This issue is inti-

mately connected with yield increase of forestry as a productive industry. If the problem will not be solved, then the Concept realization will be confined to along proclamation to transit to the intense model of developing.

**Key words:** forest regeneration, forest plantations, reforestation fund, intensification, funding, the Krasnoyarsk region, forest tending.

Обширная территория Красноярского края характеризуется большим разнообразием климатических и почвенных условий, рельефа, типов леса, способов рубок и лесовозобновления, а также интенсивностью ведения лесного хозяйства. В связи с этим лесовозобновление должно рассматриваться для конкретных подзон: северо-таежной, среднетаежной, южно-таежной, подтаежнолесостепной, горно-таежной и горно-черневой (таблица) [1].

Распределение лесовосстановления по видам (площадь, %)

Подзоны	Естественное заращивание	Содействие естественному возобновлению	Лесные культуры
Северо-таежная	100	–	–
Среднетаежная	85	15	–
Южно-таежная	25	37	38
Подтаежно-лесостепная	36	36	28
Горно-таежная и горно-черневая	37	27	36

По данным Государственного лесного реестра фонд лесовосстановления в Красноярском крае составляет 3.2 млн га, большую часть которого составляют гари – 2 млн га.

На долю вырубок приходится 0.4 млн га. Естественным путем хвойными породами может быть восстановлено только 22 % площади [2]. Следовательно, искусственное лесовосстановление должно быть проведено на площади 2.5 млн га (лесные культуры и содействие путем минерализации почвы) или 250 тыс. га в год, исходя из перспективного периода 10 лет.

Фактически, в последние годы лесовосстановление проводится на площади около 50 тыс. га ежегодно, в том числе создание лесных культур – около 5 тыс. га. Такой же объем лесокультурных работ выполнялся в начале 60-х годов XX века (например, 1961 г. – 5485 га). Объемы работ постепенно возрастали и достигли максимума в 1990 г. – 18546 га. После распада СССР они также постепенно снижались (2005 г. – 9179 га, 2015 г. – 4800 га).

За прошедшие 60 лет в крае было вырублено насаждений на площади 5.4 млн га, пройдено пожарами 15 млн га, уничтожено вредителями и болезнями 3.9 млн га. Однако покрытая лесом площадь за этот период уменьшилась только на 2.2 млн га, что свидетельствует о неплохих лесовозобновительных процессах. Искусственное лесовосстановление практически не влияет на эти процессы. Доля лесных культур (сомкнувшихся и несомкнувшихся) составляет только 0.3 % от покрытых лесом земель. Погибших лесных культур примерно

столько же. Следовательно, необходимо изменить структуру затрат на ведение лесного хозяйства в пользу противопожарных мероприятий, тем более что ущерб от лесных пожаров составляет около 12 тыс. руб. на 1 га пройденной пожаром площади [1].

Одной из ключевых задач, определенной «Основами государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года», является интенсификация использования и воспроизводства лесов. В развитие этих основ МПР России предложило «Концепцию интенсификации использования и воспроизводства лесов» и Дорожную карту по ее реализации. В соответствии с Концепцией должны быть определены территории для ведения интенсивного лесопользования и воспроизводства лесов. В интерпретации Дорожной карты – это преимущественно районы, где сосредоточены основные объемы заготовки древесины и большая часть эксплуатационных лесов находится в аренде. Территория интенсивного лесопользования составляет около 30 % от площади эксплуатационных лесов.

Общая направленность Концепции предполагает предоставление большей свободы лесопромышленникам как в части заготовки древесины, так и в части восстановления лесов. Действительно, свободы должно быть больше как у лесопромышленников, так и у лесничих в выборе способов рубки и лесовосстановления, но основным вопросом при этом является обеспечение воспроизводства лесов целевыми породами. Именно это выступает основным критерием успешности действий с обеих сторон.

К сожалению, весь опыт пионерного освоения первичных лесов свидетельствует о том, что несмотря на огромные средства и усилия по восстановлению породного состава их, желаемого результата получить не удалось. В большинстве случаев восстановительные сукцессии на вырубках таежной зоны с проведенными лесовосстановительными мероприятиями практически ничем не отличаются от таковых, где эти мероприятия не проводились. Если происходит естественная смена хвойных лесов на мягколиственные, то она идет независимо от принимаемых мер по предотвращению этого процесса.

Как предполагается изменить эту тенденцию в рамках перехода к интенсивному использованию и воспроизводства лесов пока неясно, но очевидно, что методы лесовосстановления должны кардинально отличаться от используемых в настоящее время. В зоне интенсивного использования лесов, где ежегодно вырубается десятки тысяч гектаров, реальным является использование высокотехнологичных приемов с минимизацией ручного труда, которые обеспечат высокую экономическую эффективность лесохозяйственных мероприятий. Лишь такой подход позволит обеспечить уровень затрат по выращиванию новых лесов на достаточном уровне, но это невозможно без серьезной государственной поддержки.

Практика лесопользования последних десятилетий показывает, что при переводе несомкнувшихся лесных культур или естественно сформированных молодняков в категорию хозяйственно ценных они теряются на огромных площа-

дах в силу отсутствия или недостаточности уходов, однако в отчетных материалах они числятся как рукотворные леса. Следовательно, должен быть еще один период, в течение которого проверяется успешность формирования продуктивных лесов целевого состава. В условиях Сибири этот период в зависимости от лесорастительных условий занимает до 30–50 лет.

Основной причиной сложившейся практики воспроизводства лесов является недостаточность финансирования работ. Фактические затраты на создание 1 га лесных культур не превышают 10–15 тыс. руб., чего хватает, чтобы воткнуть в землю несколько тысяч семян хвойных пород и тут же забыть о них.

Чтобы добиться удовлетворительной сохранности лесных культур с последующим перевод их в покрытые лесом земли, необходимо повысить затраты на создание 1 га лесных культур минимум до 45–52 тыс. руб. Кроме того, после их перевода необходимо проведение 2–3-кратного лесоводственного ухода с дополнительными затратами. Для сравнения, стоимость создания лесных культур в Финляндии составляет 55.2 тыс. руб. на 1 га. Кроме того, стоимость агротехнического и лесоводственного уходов 47.2 тыс. руб. на 1 га.

Если агротехнические, а затем лесоводственные уходы не проводить, то нет смысла и в проведении лесокультурных работ. В Красноярском крае уход за молодняками проводился в 2014 г. на площади 8.2 тыс. га, в 2015 г. – 5.6 тыс. га, при фонде ухода за лесом на два порядка больше. Фактически это закапывание денег в землю, поскольку результатов через 10–20 лет в лесу обнаружить не удастся.

Мировая практика показывает, что для достижения оптимального результата необходимо тратить не менее 1–2 тыс. долларов США на 1 га. Но эта проблема неразрывно связана с повышением доходности лесного хозяйства как отрасли материального производства. Если не решить эту проблему, то реализация Концепции интенсификации использования и воспроизводства лесов ограничится декларативными призывами к переходу на интенсивную модель развития [3].

Вышеизложенное свидетельствует о системном кризисе в управлении лесами Российской Федерации и о необходимости коренной реорганизации лесоправления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов В. А., Вараксин Г. С., Фарбер С. К. Организация хозяйства в лесах Красноярского края / отв. ред. И. М. Данилин; Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, Germany, 2017. – 190 с.
2. Организация устойчивого лесопользования в Красноярском крае / Соколов В. А. и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 361 с.
3. Бондарев А. И., Онучин А. А., Читоркин В. В., Соколов В. А. О концептуальных положениях использования и воспроизводства лесов в Сибири // Изв. вузов. Лесной журнал. 2015. – № 6. – С. 25–34.

© В. А. Соколов, Е. В. Горяева, 2018

## **ДЕШИФРИРОВАНИЕ ЛАНДШАФТОВ ПО ПРОДУКТИВНОСТИ НАСАЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА «АЗАС»)**

### ***Сергей Кимович Фарбер***

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, 50/28, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории таксации и лесопользования, тел. (391)249-46-35, e-mail: sfarber@ksc.krasn.ru

### ***Наталья Сергеевна Кузьмик***

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, 50/28, кандидат сельскохозяйственных наук, ученый секретарь, тел. (391)249-44-37, e-mail: natalia\_5791@mail.ru

### ***Нина Иосифовна Молокова***

Государственный природный заповедник «Азас», 668530, Россия, Республика Тыва, с. Тоора-Хем, ул. Агбаан, 20, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (394-50)2-12-99, e-mail: azasmolokova@mail.ru

В работе ландшафт отождествляется с типом местоположения, в пределах которого произрастают насаждения одного класса бонитета или преобладает растительность нелесных сообществ. Контурное дешифрирование (типизация местоположений) произведено по показателям рельефа – абсолютная высота, уклон и экспозиция – посредством пространственного анализа ЦМР SRMT. Аналитическое дешифрирование, т. е. наполнение пространства карты фоновым состоянием растительного покрова, произведено по спектральным яркостям пикселей космических снимков Landsat методом неконтролируемой классификации.

**Ключевые слова:** рельеф, продуктивность насаждений, типы лесов и нелесных сообществ, ландшафт, картографирование.

## **THE INTERPRETATION OF LANDSCAPES ON THE PRODUCTIVITY OF PLANTATIONS (FOR EXAMPLE, STATE WILDLIFE RESERVE «AZAS»)**

### ***Sergey K. Farber***

V. N. Sukachev Institute of Forest Russian Academy of Science Siberian Branch, 50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone:(391)249-46-35, e-mail: sfarber@ksc.krasn.ru

### ***Natalia S. Kuzmik***

V. N. Sukachev Institute of Forest Russian Academy of Science Siberian Branch, 50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia, Ph. D., Scientific Secretary, phone: (391)249-44-37, e-mail: natalia\_5791@mail.ru

### ***Nina I. Molokova***

State Wildlife Reserve «Azas», 20, Agbaan, Toora-Khem, Tyva Republic, 668530, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: azasmolokova@mail.ru

In the paper, landscape is identified with the type of location within which stands of one class of the site productivity are growing or vegetation of non-forest communities prevails. The contour interpretation is made according to the relief indices - absolute height, slope and exposure - by the

spatial analysis of the SRMT DEM. Analytical interpretation, made by the spectral brightness of the pixels of the Landsat scenes by the method of uncontrolled classification.

**Key words:** relief, stand productivity, types of forests and non-forest communities, landscape, mapping.

На территории заповедника «Азас» из лесных формаций абсолютно преобладают кедровые и лиственничные насаждения, лесотаксационные выделы которых поэтому используются в качестве выборочных. Количество наблюдений  $n$  выборочных выделов кедровых насаждений составило 196, лиственничных – 85. На основе лесотаксационных описаний насаждений выборочных выделов проведен корреляционный и регрессионный анализ. Получены линейные зависимости классов бонитета насаждений от абсолютных высот, экспозиций и уклонов местности (табл. 1). Оказалось, что продуктивность как кедровых, так и лиственничных насаждений уменьшается по мере набора высоты; в лиственничных теснота связи выше. Существует слабая зависимость продуктивности от экспозиции. Взаимосвязь продуктивности с уклонами отсутствует. При этом наблюдается повышение тесноты связи при исключении из выборки данных лесотаксационных выделов багульниково-сфагновых лесов.

Таблица 1

Количество наблюдений и парные коэффициенты корреляции  $r$  между продуктивностью насаждений и показателями рельефа местности

Вид зависимости	Коэффициент корреляции $r$			
	Все наблюдения	Без багульниково-сфагновых лесов	Склоны северных экспозиций	Склоны южных экспозиций
$B\_K=f(B)$	0,198 ( $n=196$ )	0,425 ( $n=178$ )	0,454 ( $n=148$ )	0,524 ( $n=84$ )
$B\_K=f(Y)$	0,014 ( $n=196$ )	0,084 ( $n=178$ )	0,045 ( $n=148$ )	0,208 ( $n=84$ )
$B\_K=f(\Xi)$	0,066 ( $n=196$ )	0,254 ( $n=178$ )	0,282 ( $n=148$ )	0,302 ( $n=84$ )
$B\_L=f(B)$	0,596 ( $n=85$ )	0,640 ( $n=77$ )	0,703 ( $n=43$ )	0,585 ( $n=53$ )
$B\_L=f(Y)$	0,213 ( $n=85$ )	0,193 ( $n=77$ )	0,241 ( $n=43$ )	0,281 ( $n=53$ )
$B\_L=f(\Xi)$	0,582 ( $n=85$ )	0,380 ( $n=77$ )	0,305 ( $n=43$ )	0,141 ( $n=53$ )

Условные обозначения:  $B\_K$  – класс бонитета кедровых насаждений;  $B\_L$  – класс бонитета лиственничных насаждений;  $B$  – абсолютная высота;  $Y$  – уклон;  $\Xi$  – экспозиция.

Заповедник расположен в пределах трапеции SRTM 54-02. Абсолютные высоты выборочных выделов получены непосредственно с раstra ЦМР с шагом классификации - 1 м. Для определения уклонов местности создан растр с шагом классификации - 1 градус. Для определения экспозиций создан растр с шагом классификации - 45 градусов. В соответствии с зависимостями (табл. 1):

- градация оси уклонов должна включать относительно плоские местоположения с уклонами (0-3) град.;

- на оси экспозиций достаточно отметить северные и южные склоны;
- ось абсолютных высот градуируется при достижении каждого следующего класса бонитета.

Таким образом, для индексации местоположений приняты входы: абсолютные высоты с образованием пяти высотных поясов, плоские местоположения с уклонами до 3-х градусов (поймы водотоков и водоразделы), склоны с уклонами более 3-х градусов, склоны северной экспозиции до 90 градусов и от 270 до 360 градусов, склоны южной экспозиции от 90 до 270 градусов. По выявленным значениям градации осей абсолютных высот, уклонов и экспозиций сформированы их векторные слои с последующим их размещением в одном слое (инструмент «пересечение»). Полученные местоположения отождествляются с ландшафтами заповедника. Индекс местоположения равно относится и к ландшафту.

В пределах одного контура местоположения (ландшафта) могут располагаться насаждения определенных типов леса и нелесных сообществ. Причина – неоднородность лесорастительных условий в долинах, водоразделах, нижних, средних и верхних частях склонов. Кроме того, для каждого местоположения наблюдается набор состояний растительного покрова от начального до конечного состояния по типам сукцессий. На снимках Landsat по типам местоположений сохраняют гамму цветов категории земель, преобладающие и сопутствующие группы пород деревьев. Поэтому в легенде карты отражены категории земель и основные направления сукцессии насаждений. Достаточное количество задаваемых классов принято до 10. Каждый класс пикселей отождествлялся с преобладающим по площади в данном ландшафте типом леса или типом нелесного сообщества. Классы пикселей, отвечающие одному набору растительных сообществ, объединялись. Кустарники, молодняки, а также не покрытые лесом земли местами могут оказаться перемешанными с погибшими насаждениями.

В среде ГИС далее возможно редактирование данных атрибутивной таблицы, а при необходимости и создание дополнительных полей. Так по мере появления новых сведений о почвенно-грунтовых условиях могут уточняться их характеристики (плодородие степень влажности). Показатели ландшафтов внесены в отдельные поля атрибутивной таблицы векторного слоя. Данные полей являются основой для получения легенды карты (табл. 2).

Полученные контура ландшафтов отвечают уровню генерализации карты масштаба 1:100 000 и являются структурными составляющими вышестоящей иерархической ступени, а именно Тоджинского округа подтаежных сосново-лиственничных и горно-таежных лиственнично-сосновых и кедровых лесов (Типы лесов ..., 1980). Существует возможность дальнейшей детализации ландшафтов. Так, в нижних высотных поясах введение дополнительных классов уклонов позволит отделить степи от болот и лугов, в верхних – скалы от кустарников и редины; наложение масок пожаров позволит уточнить местоположение гарей и производных пирогенных насаждений. Посредством дополнительного дробления местоположений появляется принципиальная возможность

выделения более мелких ландшафтных единиц – урочищ, фаций. При этом масштаб карты должен быть увеличен до 1:(25 000-50 000). Основа карты – поля атрибутивной таблицы. Данные таблицы по мере их устаревания требуют редактирования, а карта актуализации. Получение новых сведений о ландшафтах требует целенаправленных исследований, которые проводятся по планам научно-исследовательских работ заповедника.

Таблица 2

Легенда ландшафтной карты заповедника Азас (фрагмент)

Индекс местоположения	Ландшафт		Лесорастительные условия	Тип лесов и нелесных сообществ	Тип (подтип) почвы
	Тип	Генезис рельефа			
Перистепной, лесостепной и подтаежный ВПК					
1-11, 1-21	Горные таежные леса, таежные низкогогорья	Проллювиальные	До 1150 м. Поймы, надпойменные террасы, водоразделы (0-3) град.	Болото переходное осоково-сфагновое: блпр	Торфяно-болотные переходные
				Е,К_зеленомошный долинный: змд	Дерново-подзолистые (без разделения)
				Л,К_багульниково-моховой: бгmx	Подбуры темные таежные (торфянистые) + таежные глеевые торфянисто-перегнойные
				Редины К_багульниково-сфагновый: бгсф	Торфяные болотные верховые
1-12	Горные таежные леса, таежные низкогогорья	Денудационно-эрозионные	До 1150 м. Северные склоны	К,Е_зеленомошно-крупнотравный: змкр	Дерново-подзолистые (без разделения)
				Л,К_багульниково-моховой: бгmx	Подбуры темные таежные (торфянистые) + таежные глеевые торфянисто-перегнойные
				Л,К_зеленомошно-багульниковый: змбг	Подбуры темные таежные (торфянисто-перегнойные)
				Л,С_голубично-моховой: глmx	Таежные глеевые торфянисто-перегнойные
				Редины Л_бгmx	Подбуры темные таежные (торфянистые) + таежные глеевые торфянисто-перегнойные
				Ерник мохово-болотный: мхбл	Торфянисто-глеевые болотные

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арманд Д. Л. Наука о ландшафте. – М.: Мысль, 1975. – 288 с.
2. Гвоздецкий Н. А., Исаченко А. Г. К проблеме физико-географического районирования. – Изд-во В.Г.О., 1962, № 6. – С. 462.
3. Исаченко А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. – М.: Высшая школа, 1991. – 368 с.
4. Калашников Е. Н., Киреев Д. М. Основы ландшафтно-статистического метода лесоинвентаризации. – Новосибирск: Наука, 1978. – 144 с.
5. Нееф Э. Теоретические основы ландшафтоведения. М: Прогресс. 1974. – 220 с.
6. Прокаев В. И. Основы методики физико-географического районирования. – Л., 1967. – 119 с.
7. Рихтер Г. Д. Основные факторы и закономерности территориальной дифференциации природы СССР и физико-географическое районирование. – Т. VIII. М.: Земледелие, 1969. – 36 с.
8. Седых В. Н. Формирование кедровых лесов Приобья. – Новосибирск: Наука, 1979. – 110 с.
9. Седых В. Н. Аэрокосмический мониторинг лесного покрова. – Новосибирск: Наука, 1991. – 239 с.
10. Солнцев Н. А. О морфологии природного географического ландшафта / Вопросы географии, 1949, Вып. 16. – С. 61-86.
11. Солнцев Н. А. История физико-географического районирования европейской части СССР // Физико-географическое районирование СССР. М., 1962. – С. 6-54.
12. Сочава В. Б. Учение о геосистемах. Современный этап комплексной физической географии. – М.: Изд-во АН СССР, 1972, № 3. – С. 20.
13. Сукачев В. Н. Основы лесной типологии и биогеоценологии. – Л.: Наука. 1972. Т. 1. – С. 283.

© С. К. Фарбер, Н. С. Кузьмик, Н. И. Молокова, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>А. А. Якименко, Д. А. Караваев, А. Е. Морозов.</i> Опыт использования нейронной сети для определения местоположения и геометрических характеристик кавернозных включений .....	3
2. <i>А. П. Григорюк, В. В. Ковалевский, Л. П. Брагинская.</i> Исследование поляризации сейсмических волн при вибросейсмическом мониторинге .....	10
3. <i>А. В. Михеева, И. И. Калинин.</i> Методы выявления геодинамических мегаструктур по геофизическим данным .....	17
4. <i>В. В. Ковалевский, А. Г. Фатьянов, Д. А. Караваев, А. В. Терехов, Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк.</i> Математическое моделирование и экспериментальные исследования вибросейсмических волновых полей в Южном Прибайкалье .....	26
5. <i>О. В. Сересева, В. Ф. Рапута, Т. В. Ярославцева, А. М. Медвяцкая, П. В. Глотов.</i> Анализ данных сетевых наблюдений субмикронных аэрозолей в атмосферном воздухе г. Новосибирска.....	37
6. <i>В. Ф. Рапута, Д. В. Юсупов, Т. В. Ярославцева, Е. Е. Ляпина, Е. М. Турсуналиева.</i> Экспериментальное исследование и численный анализ распространения ртути в окрестностях Новосибирского завода химконцентратов .....	48
7. <i>Л. И. Курбацкая, А. Ф. Курбацкий.</i> Расчет нейтрального турбулентного течения Экмана с модифицированным транспортным членом уравнения спектрального потока энергии .....	59
8. <i>А. А. Добрынина, В. В. Чечельницкий, С. А. Макаров.</i> Анализ сейсмических записей прохождения водокаменного селя на реке Кынгарга (Бурятия) 2014 г. ....	66
9. <i>Г. М. Воскобойникова, М. С. Хайретдинов.</i> Распространение акустических волн сквозь проницаемые препятствия .....	76
10. <i>Ш. Х. Имомназаров, А. А. Михайлов, В. Н. Доровский.</i> Численное решение одной динамической задачи магнитопороупругости .....	87
11. <i>Х. Х. Имомназаров, У. К. Турдиев.</i> Об одной системе уравнений типа Бюргерса, возникающей в двухжидкостной среде.....	95
12. <i>Х. Х. Имомназаров, Р. К. Юсупов.</i> Об одном интегро-дифференциальном уравнении динамической теории пороупругости .....	104
13. <i>Д. А. Караваев.</i> Алгоритм и программы моделирования двумерных сейсмических полей и их практическое применение.....	112
14. <i>В. Н. Мартынов, Б. М. Глинский, Д. А. Караваев, А. Ф. Сапентина.</i> Моделирование вибросейсмического мониторинга вулканических структур .....	122

15. <i>М. В. Якутин, Л. Ю. Анопоченко, А. Н. Пучнин.</i> Особенности экологического мониторинга озер Сибири в условиях глобального изменения климата.....	133
16. <i>А. Н. Пучнин, М. В. Якутин.</i> Запасы почвенного органического вещества в мониторинге аласных экосистем Лено-Вилуйского междуречья.....	145
17. <i>Т. О. Перемитина, И. Г. Яценко.</i> Использование вегетационных индексов NDVI для оценки динамики растительности нефтедобывающих территорий Западной Сибири .....	154
18. <i>А. В. Пелипенко, О. Н. Шплис.</i> Влияние природно-климатических опасностей на продуктивность <i>Solanum Tuberosum</i> L. в условиях Томской области.....	164
19. <i>Н. А. Никитина.</i> Обзор современных методов исследования лесного покрова по данным дистанционного зондирования.....	174
20. <i>Е. В. Михайлова, Н. П. Миронычева-Токарева, Е. А. Сайб, Б. В. Миляев.</i> Растительная индикация уровня подтопления во времени лесоболотных комплексов таежной зоны Западной Сибири.....	178
21. <i>Г. П. Мартынов, А. В. Могильникова.</i> Статистический анализ изменений метеорологических данных Московской области за 30 лет.....	188
22. <i>В. И. Макаров, С. А. Попова, С. Н. Дубцов, М. Е. Плехотниченко.</i> Спектр размеров и химический состав дымовой эмиссии при УФ облучении в режиме тлеющего горения лесных материалов.....	196
23. <i>Ю. С. Ларионов, В. Б. Жарников, О. А. Ларионова, А. А. Стуканов.</i> Экологические основы земледелия и закона плодородия почв.....	202
24. <i>О. Н. Николаева.</i> Картографическое моделирование природно-ресурсного геоинформационного пространства региона для рационализации природопользования .....	209
25. <i>Б. М. Клёнов, М. В. Якутин.</i> Емкость катионного обмена гумусового комплекса почв широтного трансекта Западной Сибири .....	218
26. <i>К. С. Исабекова, С. М. Кудеринов, Е. Н. Сембаев, Н. А. Кудеринова, Г. Б. Оразбекова, Г. С. Сейтказина.</i> Радиоэкологический мониторинг окружающей среды на территории угольного месторождения «Каражыра».....	224
27. <i>Г. А. Иванова, А. В. Иванов, С. В. Жила, И. Е. Фридрих.</i> Мониторинг последствий пожаров в сосняках Средней Сибири .....	231
28. <i>Д. С. Дубовик, М. В. Якутин.</i> Использование данных дистанционного зондирования Земли в исследовании степей Улуг-Хемской котловины Республики Тыва .....	238
29. <i>В. В. Головкин, А. П. Беланова, Г. А. Зуева.</i> Эмиссия кластеров пыльцевых зерен анемофильных растений при поступлении их пыльцы в атмосферу .....	248

30. <i>В. В. Головки, В. Л. Истомина, К. А. Хлебус, А. П. Беланова.</i> Определение скоростей седиментации пыльцевых частиц ветроопыляемых растений, произрастающих на территории Центрального сибирского ботанического сада СО РАН.....	257
31. <i>И. И. Бочкарева, А. В. Борисова.</i> Экологический сбор как средство стимулирования ресурсосбережения .....	266
32. <i>В. С. Андриевский, М. В. Якутин, Н. П. Косых.</i> Почвенно-зоологические методы в экологическом мониторинге тундровых почв нижнего течения реки Таз (ЯНАО) .....	269
33. <i>Р. А. Амикишиева, Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рапута.</i> Геоинформационная система планирования эксперимента и анализа данных процессов атмосферного загрязнения .....	279
34. <i>М. Н. Алексеева, И. Г. Яценко.</i> Детектирование факельных установок и определение зон их теплового воздействия на нефтедобывающие территории Томской области .....	287
35. <i>А. В. Могильникова, Г. П. Мартынов.</i> Применение современного программного обеспечения STATISTICA для анализа больших массивов данных по содержанию кислорода в воздухе Москвы за период с 1983 по 2012 год .....	297
36. <i>С. П. Казьмин.</i> Особенности водного режима почвообразующих пород ленточных боров .....	307
37. <i>Ю. Н. Ильичев.</i> Оценка перспективы использования зимних и зеленых черенков для выращивания привитых крупномерных саженцев сосны обыкновенной .....	312
38. <i>В. А. Соколов, Е. В. Горяева.</i> О воспроизводстве лесов в Красноярском крае .....	317
39. <i>С. К. Фарбер, Н. С. Кузьмик, Н. И. Молокова.</i> Дешифрирование ландшафтов по продуктивности насаждений (на примере государственного природного заповедника «Азас») .....	321

## CONTENTS

1. <i>A. A. Yakimenko, D. A. Karavaev, A. E. Morozov.</i> The Experience of Using a Neuron Network for the Determination of Location and Geometric Characteristics of Cuverness Inclusions .....	3
2. <i>A. P. Grigoruk, V. V. Kovalevsky, Ludmila P. Braginskaya.</i> Study of Polarization of Seismic Waves During the Vibroseismic Monitoring .....	10
3. <i>A. V. Mikheeva, I. I. Kalinnikov.</i> Methods of Geodynamic Megastructures Detecting on Geophysical Data .....	17
4. <i>V. V. Kovalevskiy, A. G. Fatyanov, D. A. Karavaev, A. V. Terekhov, L. P. Braginskaya, A. P. Grigoruk.</i> Mathematical Modeling and Experimental Investigations of Vibro Seismic Wave Fields in Baikal Region .....	26
5. <i>O. V. Sereseva, V. F. Raputa, T. V. Yaroslavtseva, A. M. Medvyatskaya, P. V. Glotov.</i> Analysis of Data From Network Observations of Submicron Aerosols in the Air of Novosibirsk City .....	37
6. <i>V. F. Raputa, D. V. Yusupov, T. V. Yaroslavtseva, E. E. Lyapina, E. M. Tursunaliyeva.</i> Experimental Study and Numerical Analysis of Mercury Distribution Around the Novosibirsk Chemical Concentrates Plant .....	48
7. <i>L. I. Kurbatskaya, A. F. Kurbatskiy.</i> Calculation of the Neutral Turbulent Ekman Flow with the Modified Transport Term in the Prognostic Equation of the Spectral Energy Flux .....	59
8. <i>A. A. Dobrynina, V. V. Chechelnitisky, S. A. Makarov.</i> Analysis of Seismic Records of the Transmit of Catastrophic Water-Stone Debrisflow on the Kyngarga River (Republic of Buryatia) 27-29 June, 2014.....	66
9. <i>G. M. Voskoboynikova, M. S. Khairtdinov.</i> Propagation of Acoustic Waves Through Permeable Obstacles.....	76
10. <i>Sh. Kh. Imomnazarov, A. A. Mikhailov, V. N. Dorovsky.</i> Numerical Solution of one Dynamic Magnetoporoelasticity Problem.....	87
11. <i>Kh. Kh. Imomnazarov, U. K. Turgunov.</i> About a System of the Burgers-Type Equations in a Two-Fluid Medium.....	95
12. <i>Kh. Kh. Imomnazarov, R. K. Yusupov.</i> About one Integral and Differential Equation of the Dynamic Poroelasticity Theory.....	104
13. <i>D. A. Karavaev.</i> Algorithm And Programm Codes for 2d Seismic Field Simulation and Computation, and Their Practical Application.....	112
14. <i>V. N. Martynov, B. M. Glinsky, D. A. Karavaev, A. F. Sapetina.</i> Simulation of Volcanic Structures Vibroseismic Monitoring.....	122
15. <i>M. V. Yakutin, L. Yu. Anopchenko, A. N. Puchnin.</i> Features of Ecological Monitoring of Siberian Lakes in Conditions of Global Climate Change .....	133
16. <i>A. N. Puchnin, M. V. Yakutin.</i> Stocks of Soil Organic Matter in Monitoring of Alas Ecosystems in the Lena-Vilyui Interfluve .....	145

17. <i>T. O. Peremitina, I. G. Yashchenko.</i> Evaluating The Dynamics of Vegetation of Oil-Extracting Territories in Western Siberia Based on Vegetation NDVI Indices.....	154
18. <i>A. V. Pelipenko, O. N. Shplis.</i> Influence of Natural and Climatic Hazards on the Productivity Of <i>Solanum Tuberosum</i> L. in the Conditions of Tomsk Region.....	164
19. <i>N. A. Nikitina.</i> Review of Modern Research Methods of Forest Cover by Remote Sensing.....	174
20. <i>E. V. Mikhailova, N. P. Mironycheva-Tokareva, E. A. Sayb, B. V. Milyaev.</i> Plant Indication of the Level of Time Flooding of Forest-Bogs Complexes of the Taiga of Western Siberia.....	178
21. <i>G. P. Martynov, A. V. Mogil'nikova.</i> Statistical Analysis of Changes in Meteorological Data of Moscow Region for 30 Years.....	188
22. <i>V. I. Makarov, S. A. Popova, S. N. Dubtsov, M. E. Plokhotnichenko.</i> Size Distribution and the Chemical Composition of Smoke Emission Under UV Irradiation Upon Smoldering Combustion of Forest Fuels.....	196
23. <i>U. S. Larionov, V. B. Zharnikov, O. A. Larionova, A. A. Stukanov.</i> Ecological Bases of Agriculture and the Soil Fertility Law.....	202
24. <i>O. N. Nikolaeva.</i> Cartographic Modeling of Natural Resource Geospace for Natural Resource Management.....	209
25. <i>B. M. Klenov, M. V. Yakutin.</i> Cation Exchange Capacity of Humus Complex in the Soil Latitudinal Transect in Western Siberia.....	218
26. <i>K. S. Isabekova, S. M. Kuderinov, E. N. Sembaev, N. A. Kuderinova, G. B. Orazbekova, G. S. Seitkazina.</i> Radioecological Monitoring of the Environment in the Territory of «Karazhyra» Coal Field.....	224
27. <i>G. A. Ivanova, A. V. Ivanov, S. V. Zila, I. E. Fridrich.</i> Monitoring of Fire Effects on Pine Forests of Central Siberia.....	231
28. <i>D. S. Dubovik, M. V. Yakutin.</i> Use of Remote Sensing Data in the Study of the Steppes of Ulug-Chem Depression in the Tuva Republic.....	238
29. <i>V. V. Golovko, A. P. Belanova, G. A. Zueva.</i> Emission of the Pollen Grain Clusters of Anemophilic Plants Upon Pollen Ingress into the Atmosphere.....	248
30. <i>V. V. Golovko, <u>V. L. Istomin</u>, K. A. Khlebus, A. P. Belanova.</i> Determination of the Sedimentation Rates of the Pollen Grains of Anemophilic Plants Growing Over the Territory of the Central Siberian Botanical Gardens of SB RAS.....	257
31. <i>I. I. Bochkareva, A. V. Borisova.</i> The Environmental Fee as a Means of Stimulation of Resource Saving.....	266
32. <i>V. S. Andrievskiy, M. V. Yakutin, N. P. Kosykh.</i> Soil-Zoological Methods in Ecological Monitoring of Tundra Soils of the Lower Reaches of the Taz River (Yamal-Nenets Autonomous District).....	269

33. <i>R. A. Amikishieva, T. V. Yaroslavtseva, V. F. Raputa.</i> Geoinformation System of Experiment Planning and Analysis of Atmospheric Pollution Processes.....	279
34. <i>M. N. Alexeeva, I. G. Yashchenko.</i> The Detection of Flares and the Definition of Their Zones of Thermal Influence Oil on the Territory of Tomsk Region .....	287
35. <i>A. V. Mogil'nikova, G. P. Martynov.</i> The use of Modern Software STATISTICA for Analysis of Large Data Sets on the Content of Oxygen in the Air of Moscow in the Period From 1983 to 2012 .....	297
36. <i>S. P. Kazmin.</i> Peculiarities of Water Regime of Soil-forming Rocks of Band Strains .....	307
37. <i>Yu. N. Ilichev.</i> Assessment of Prospect of use of Winter and Green Shansrs tor Cultivation of the Imparted Large Saplings of <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	312
38. <i>V. A. Sokolov, E. V. Goryaeva.</i> On Forest Regeneration in the Krasnoyarsk Region .....	317
39. <i>S. K. Farber, N. S. Kuzmik, N. I. Molokova.</i> The Interpretation of Landscapes on the Productivity of Plantations (for Example, State Wildlife Reserve «Azas») .....	321

*Научное издание*

# **ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ**

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

## **«ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ФОТОГРАММЕТРИЯ, МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

Т. 2

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 05.10.2018. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 19,30. Тираж 100 экз. Заказ 126.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.