

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ МИНЕРАЛОГИИ, ГЕОХИМИИ И КРИСТАЛЛОХИМИИ
РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Е.П. ЯНИН

РУСЛОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ
РАВНИННЫХ
РЕК

(геохимические особенности
условий формирования
и состава)



МОСКВА - 2002

УДК 551.4+550.4

Янин Е.П. Русловые отложения равнинных рек (геохимические особенности условий формирования и состава). - М.: ИМГРЭ, 2002. - 139 с.

В работе систематизированы сведения о строении, вещественном составе и геохимических особенностях руслового аллювия равнинных рек, образующегося в природных условиях. Описываются эрозионно-аккумулятивные процессы, играющие основную роль в формировании твердого стока и отложений рек. Рассматриваются геохимические условия аллювиальной обстановки осадконакопления.

Представляет интерес для геохимиков, осуществляющих прикладные работы, связанные с поиском полезных ископаемых, картированием и экологической оценкой равнинных территорий, а также для студентов указанных специальностей.

Табл. 71; рис. 30; список лит. - 178 назв.

Ответственные редакторы:

Э.К. Буренков,
Н.К. Дмитренко

© Янин Е.П., 2002
© ИМГРЭ, 2002

Введение

Гидрографическая сеть и флювиальные формы рельефа, создаваемые деятельностью водотоков, определяют морфологический облик, пространственную мозаику и ландшафтные особенности многих территорий земной поверхности. Например, на Русской равнине гидрографическая сеть и связанные с ней по условиям образования земельные участки занимают до 20-30% всей территории. В ходе своего развития русловые потоки формируют аллювий, который является одним из важнейших генетических типов континентальных отложений и широко распространен в осадочных образованиях практически любого геологического возраста.

Аллювиальные отложения равнинных рек привлекали к себе внимание многих исследователей, в том числе таких выдающихся отечественных естествоиспытателей, как В.В. Докучаев, С.Н. Никитин, А.П.Павлов. К настоящему времени неплохо изучены условия и материальные источники формирования аллювия (Н.И. Алексеевский, Ю.А. Библин, А.П. Дедков, И.П. Ковальчук, Г.А. Ларионов, Б.С. Лунев, Н.И.Маккавеев, Г.В. Обедяева, Ю.Г. Симонов, И.В. Старостина, Н.М.Страхов, Н.В. Хмелева, Г.И. Швец, Н.А. Шило, Е. Laursen, R.Horton и др.), механизмы транспорта наносов и образования речных отложений (Н.И. Алексеевский, В.С. Боровков, М.А. Великанов, В.Н. Гончаров, К.В.Гришанин, А.В. Караушев, И.А. Ключанова, Н.Е. Кондратьев, В.В.Ламакин, И.И. Леви, В.М. Маккавеев, Н.И. Маккавеев, Ц.Е. Мирцхулава, И.В. Попов, К.И. Россинский, Р.С. Чалов, В.А.Чудаева, Г.И. Шамов, Е.В.Шанцер, J.R.L. Allen, R. Vagnold, V.R.Baker, I. Bogardi, C. Chickmay, С.Н. Crickway, H. Einstein, K. Gregory, S. Schumm, V. Vanoni и др.), их стратиграфия и фациальное расчленение (Г.И. Горецкий, И.П. Карташов, Ю.А. Лаврушин, А.А. Лазаренко, В.В. Ламакин, Г.В. Лопатин, Н.А. Махнач, Г.Ф. Мирчинк, Н.И. Николаев, А.А. Чистяков, Е.В. Шанцер, J. Harms и др.), особенности формирования и строения флювиальных форм рельефа (Н.Б. Барышников, К.М. Беркович, В.Р. Вильямс, А.М. Дмитриев, Р.А.Еленевский, Н.С. Знаменская, Н.Е. Кондратьев, Н.И. Маккавеев, Н.А.Ржаницын, А.Ю. Сидорчук, Б.Ф. Смищенко, Р.С. Чалов, А.В. Чернов, J.R.L. Allen, В. Balatka, В. J. Bluck, С. Chickmay, W. Graf, L.V.Leopold, M.R. Leeder, A. Paluska, Н.Е. Reineck, I. Singh, M. Wolman и др.), гранулометрический, минеральный и петрографический состав аллювия (В.П. Батурин, О.А. Борсук, И.М. Константинова, А.А. Лазаренко, Б.С. Лунев, В.М. Мотуз, Б.М. Осовецкий, Л.Б. Рухин, Е.В. Рясина, Н.Г. Судакова, С.Л.Шиманович, С.Н. Edelman, R. Russell и др.), его физические и инженерно-геологические характеристики (С.П. Абрамов, Б.Г.Еськов, Т.С. Кавеев, Ц.Е. Мирцхулава, К.М. Панова, Л.А. Шимановский и др.). Заметное количество работ посвящено изучению механизма

формирования и поискам аллювиальных россыпей (Ю.А. Билибин, Н.Г.Бондаренко, Е.З. Горбунов, И.П. Карташов, А.В. Костерин, Н.И.Маккавеев, Г.В. Нестеренко, Б.И. Прокопчук, Ю.Н. Трушков, Н.В.Хмелева, Н.А. Шило, R. Bligh и др.), использованию речных отложений при поисках месторождений и проведении геохимического картирования (Э.Г. Абисалов, С.П. Албул, Л.В. Антропова, А.Н. Боголюбов, В.П.Бородин, А.И. Германов, Н.В.Квашневская, А.В. Костерин, В.И.Красников, А.А. Матвеев, В.В.Поликарпочкин, А.П. Соловов, Н.Н.Сочеванов, Г.И. Хорин, Ю.В.Шарков, R. Boyle, L. Filipek, I. Nichol, I.Thornton, J. Webb и др.). Аллювиальные отложения изучаются при разведке месторождений песка и гравия (В.М. Борзунов, М.М. Кравченко, Г.М. Ляхов, В.В. Ревин и др.). В меньшей степени освещены вопросы, связанные с геохимией аллювиального литогенеза, однако и здесь имеются существенные достижения (В.А. Артемьев, В.В. Гордеев, И.Д. Данилов, В.А.Кузнецов, И.М. Константинова, А.А. Лазаренко, А.Д. Хованский, R.Berner, R. Gibbs, A. de Groot, U. Förstner, I. Jonasson и др.).

В настоящее время русловые отложения используются в прикладных эколого-геохимических исследованиях в качестве своеобразного индикатора состава, интенсивности и масштабов техногенного загрязнения рек и являются одним из основных объектов опробования при эколого-геохимическом картировании разнообразных территорий. В то же время, как утверждал В.В. Докучаев, рассматривать аллювий - «данное явление, данный предмет природы» - с одной лишь утилитарной точки зрения (в данном случае, - как объект опробования) всегда было и будет величайшей ошибкой. Известно, что в природных условиях в системах «водосбор-русло» и «эрозия-транспорт-аккумуляция» существует определенный баланс осадочного материала. С этих позиций, по выражению А.П. Павлова, «каждая река представляет механизм, строго урегулированный» [95]. В техногенных условиях данный урегулированный механизм в силу различных причин может нарушаться, что в большинстве случаев приводит к негативным (с утилитарной точки зрения) последствиям. В частности, установлено, что воздействие разнообразных техногенных факторов вызывает изменение естественных условий осадконакопления и обуславливает образование в реках промышленно-урбанизированных районов нового типа отложений - техногенных илов, в существенной мере определяющих геохимические параметры и соответственно экологическое состояние водных систем [145, 146, 149, 151-153].

В свою очередь, изучение последствий техногенного осадконакопления в реках, эффективное использование речных отложений при экологической оценке и геохимическом картировании требует от практических работников знаний о строении, вещественном составе и геохимических свойствах руслового аллювия, источниках его формирования в естественных (фоновых) условиях. В предлагаемой работе, имеющей справоч-

ный характер и подготовленной в рамках осуществляемых в ИМГРЭ комплексных эколого-геохимических исследований окружающей среды, составной частью которых является изучение процессов и продуктов техногенного аллювиального седиментогенеза, предпринята попытка систематизации наиболее важных, на взгляд ее составителя, сведений, характеризующих важнейшие природные источники питания рек осадочным материалом, основные закономерности образования, строения и морфологического проявления современного аллювия в руслах равнинных рек, его вещественный состав и геохимические особенности в фоновых условиях.

Автор признателен Э.К. Буренкову, Н.К. Дмитренко и А.А. Кременецкому за доброжелательную поддержку, конструктивные замечания и ценные советы.

Общая характеристика речных отложений и условий их образования

Седиментогенез справедливо рассматривается как важнейший процесс естественной динамики поверхности Земли, с которым связаны дифференциация вещества и миграция химических элементов. Его основные продукты - рыхлые осадочные отложения - представляют собой геологические тела, приуроченные к определенным участкам биосферы и различающиеся, прежде всего, строением, вещественным составом и геохимическими свойствами. В общей схеме седиментогенеза Н.М. Страхов различает два последовательных этапа: 1) водосборный (склоново-долинно-дельтовый) седиментогенез и 2) бассейновый седиментогенез [126]. Важнейшим материальным продуктом первого этапа является аллювий, т. е. отложения, накапливающиеся в долинах рек в результате сноса и аккумуляции рыхлых продуктов выветривания, а также осадочного материала, образующегося при разрушении горных пород самим водным потоком, и слагающие речные русла, поймы и террасы [26, 32].

В своей классификации генетических типов континентальных осадочных образований Е.В. Шанцер [138] выделяет парагенетический ряд - водный (аквальный), парагенетическую группу - отложения русловых водных потоков (флювиальная группа), генетический тип - аллювий. Так как аллювий литогенетически весьма неоднороден, то в его составе, подчеркивает Е.В. Шанцер, можно выделить разнообразные литогенетические типы отложений, отличающиеся по характеру динамики среды накопления, а соответственно и по своим структурным и текстурным признакам. Следует отметить, что Е.В. Шанцер [138] под аллювием понимает отложения всяких русловых потоков, включая временные и пересыхающие водотоки, а не только отложения постоянных рек, поскольку, по его мнению, с точки зрения места в общей картине глиптогенеза суши (т. е. совокупного действия экзогенных факторов по преобразованию поверхности суши) и динамико-геологической характеристики процесса осадконакопления они принципиально не отличаются друг от друга.

Традиционно различают современный аллювий и древний (вплоть до протерозойского возраста включительно) аллювий. К современному аллювию чаще всего относят отложения голоценового возраста, а некоторые авторы, например М. Лидер [71], - четвертичного возраста, для формирования стратиграфического разреза которых решающее значение имели плейстоценовые колебания уровня моря и климатические изменения. В.А.Кузнецов [58] по времени формирования и связи с современной деятельностью рек разделяет голоценовый аллювий на две группы отложений: 1) слагающих повышенную пойму, вышедшую из стадии регулярного накопления осадочного материала, и 2) связанных с действующими

щим руслом, старицами и поверхностью периодически заливаемой поймы (они часто называются новейшими отложениями).

В геолого-географической литературе при рассмотрении современных отложений наряду с терминами «аллювий» и «аллювиальные отложения» широко применяются словосочетания «речные наносы» и «речные отложения» (распространенный терминологический элемент «осадки» - донные осадки, речные осадки, русловые осадки, пойменные осадки и т. д. - из-за его известной многозначности в данной работе не используется и не рассматривается). Многие исследователи (как правило, гидравлики, реже – гидрологи и геоморфологи) явно используют указанные термины как синонимы (что следует из контекста соответствующих работ). Например, в известном учебнике по гидрологии [75] речными наносами называются твердые частицы, образованные в результате эрозии водосборов и русел, переносимые водотоками и формирующие их ложе. И.С.Щукин также однозначен в своей трактовке терминов: «речные наносы, или аллювий» [142]. В некоторых работах, посвященных речным наносам, различают «взвешенные наносы» (частицы, находящиеся во взвешенном в воде состоянии), «донные наносы» (катящиеся и движущиеся скачкообразно частицы), пишут о «транспорте (взвешенных и донных) наносов», используют такие термины, как «донные отложения» и «грунт», под которыми понимают «собственные отложения рек» [109].

Специалисты в области русловых процессов и флювиальной геоморфологии обычно различают понятия «речные наносы» и «речные (аллювиальные) отложения». Так, речные наносы представляют собой продукты эрозии (водосбора, склонов, русла), поступающие в водные потоки и *транспортируемые* ими в направлении движения потока [3, 68]. Это подчеркивается и в словаре [25]: наносы - твердые частицы, *переносимые* течениями в реках (в обоих случаях выделено мною - Е.Я.). Таким образом, речные наносы - это осадочный материал, который транспортируется (переносится) речным потоком (во взвешенном, влекомом состоянии, путем сальтации и т. д.). Речные отложения (аллювиальные отложения, или аллювий) образуются вследствие аккумуляции речных наносов [3], т. е. являются конечным продуктом аллювиального осадкообразования (в реальности образование речных отложений происходит не только в результате аккумуляции только твердых наносов, но и вследствие действия различных физико-химических, геохимических и биогеохимических процессов - Е.Я.). Именно аллювиальные отложения создают разнообразные формы флювиального рельефа. Таким образом, современные речные отложения (аллювий) - это рыхлые осадочные образования, слагающие русло, пойму и террасы рек. Такое понимание рассмотренных терминов сохраняется в настоящей работе.

В основе учения об осадочных породах лежит допущение, согласно которому условия, существующие в каждой обстановке осадконакопления,

определяют свойства сформировавшихся здесь отложений. В понятие «обстановка осадконакопления» включаются место (или, по Ф. Петтиджону [99], геоморфологическая единица, имеющая определенные размеры и форму), где происходит накопление осадочного материала, физические, химические и биологические условия, характеризующие среду осадконакопления, и процесс, обуславливающий аккумуляцию материала [127] (рис. 1). Особое значение имеют источники и пути поступления осадочного материала в данную (например, в аллювиальную) обстановку осадконакопления. Изменения условий осадконакопления и характеристик источников питания осадочным материалом сопровождаются трансформацией не только темпов образования рыхлых отложений, но и их морфологического облика, строения, вещественного состава и геохимических свойств.

В природных условиях формирование аллювиальных отложений в значительной степени определяется характером и интенсивностью процессов размыва и смыва почв и горных пород, транспорта и отложения осадочного материала водными потоками, совокупность которых составляет комплекс эрозионно-аккумулятивных процессов. Их разделяют на процессы эрозии почв, процессы овражной эрозии и русловые процессы [82]. Последние характеризуют совокупность явлений, возникающих при взаимодействии руслового потока и грунтов, слагающих русла и берега рек, определяющих развитие различных форм речных русел и руслового рельефа, режим их сезонных, многолетних и вековых изменений, обуславливающих размывы дна и берегов рек и осуществляющих транспорт и аккумуляцию наносов [103]. Говоря проще, русловые процессы - это постоянно происходящие изменения морфологического строения речного русла и поймы, обусловленные действием текучей воды.

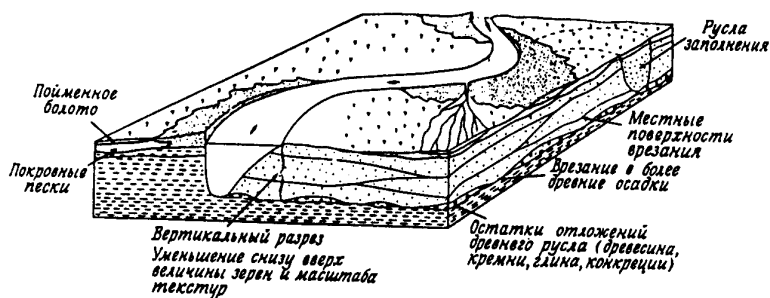


Рис. 1. Геоморфологическая модель аллювиальной обстановки осадконакопления (показаны взаимосвязь между покровными песками, русловыми отложениями, прирусловыми валами и остаточными отложениями, отчасти внутреннее строение разреза долины и типы преобладающих седиментационных структур и текстур) [127]

Эрозию почв и овражную эрозию часто называют просто эрозионными процессами. Сопряженность эрозии и аккумуляции особенно наглядно проявляется в постоянных водотоках, транспортирующая способность которых в первую очередь определяется скоростями их течения, зависит от их водности и уклона, интенсивности поступления в русло твердого материала [79-82]. Вещественный состав последнего обуславливается геолого-геоморфологическими особенностями водосборов, контролирующей интенсивность протекающих в их пределах эрозионных и склоновых процессов. Конечный результат сопряженного действия процессов эрозии и аккумуляции в значительной мере зависит от гидрологического режима водотоков, который, в свою очередь, определяется взаимодействием факторов, прямо или косвенно влияющих на формирование речного стока.

Главными свойствами речного (руслового) стока являются [133]: 1) интенсивное и сравнительно большое поступление воды для питания речной системы; 2) малая естественная зарегулированность (за исключением рек только с ледниковым питанием); 3) резко выраженное неустановившееся движение воды в русле. Обычно любая река отличается присутствием только ей водным режимом, представляющим изменение во времени уровней, расходов и объемов воды. Тем не менее большинство рек обладают общими в разрезе года гидрологическими фазами, важнейшие из которых - половодье, паводки, летняя и зимняя межени. В пределах России в зависимости от внутригодового распределения стока различают следующие основные типы рек (по Б.Д. Зайкову и П.С. Кузину): 1) с преобладающим весенним половодьем (распространены на большей части страны, весной на них проходит 50-80% годового стока, в засушливых районах часто до 100%; осенью могут наблюдаться паводки); 2) с весенним половодьем и летними паводками (реки предгорных районов Кавказа, Алтая, Саян, Вост. Сибири, Северо-Востока); 3) с преобладающими летними паводками (реки высокогорных районов, реки Дальнего Востока); 4) субтропических районов с паводками в осенне-зимней период или в течение всего года (реки Черноморского побережья). Максимум годового стока наблюдается в тундре, максимум годовых осадков – в лесной зоне, максимум испарения с поверхности суши – в степной зоне (табл. 1).

Таблица 1. Элементы водного и радиационного балансов по гидрологическим зонам территории быв. СССР [56]

Зона	Осадки, мм	Сток, мм	Испарение с суши, мм	Коэффициент стока	Радиационный баланс, ккал/см ² /год
Арктическая	200-400	200-350	0-50	0,8-1,0	0-5
Тундровая	200-500	125-400	50-100	0,6-0,8	5-10
Лесная	250-650	120-320	100-450	0,2-0,7	10-32
Степная	275-550	15-100	215-450	0,05-0,2	15-35
Полупустынная	220-300	10-15	210-280	0,03-0,06	28-35
Пустынная	125-150	1-5	125-145	0,01-0,03	32-40

В конкретных условиях гидрологический режим рек определяется множеством местных факторов, но ведущее значение имеют источники водного питания и(или) их соотношение (табл. 2, 3).

Таблица 2. Источники питания равнинных рек европейской части быв. СССР [121]

Зона	Поверхностное питание, %			Подземное питание, %		
	снеговое	дождевое	всего	верхнее почвенно-грунтовое	глубокое грунтовое и подземное	всего
Лесная	30-35	10-20	40-55	20-25	25-35	45-60
Лесостепная	35-50	10-15	45-65	15-25	20-30	35-55
Степная	60-70	0-10	60-80	10-20	10-20	20-40
Полупустынная	90-100	0-10	90-100	0	0-10	0-10

Таблица 3. Относительное распределение стока р. Пахры (Московская область) по сезонам года [107]

Период (годы)	Сток, % от годового			
	Весна	Лимитирующий период	Лето - осень	Зима
1932 - 1966	67,6	32,4	24,9	7,5
1935 - 1966	70,2	29,8	21,6	8,2
1947 - 1966	68,3	31,7	22,4	9,3
1952 - 1966	68,0	32,0	22,6	9,4

Для характеристики временного изменения водоносности реки используют гидрографы, т.е. графики трансформации во времени расходов воды за год или какую-либо его часть в конкретном створе наблюдения, которые строятся по среднесуточным расходам. Распределение речного стока по видам и источникам питания зависит от климатических условий, определяющих величину и распределение осадков и температуры воздуха, и от характеристик подстилающей поверхности, обуславливающих вертикальное расчленение стока на поверхностный и подземный. Практически на каждом гидрографе имеется переходный участок на кривой спада, характеризующий так называемый промежуточный (почвенный) сток с зарегулированностью, большей поверхностного и меньшей подземного стока. Промежуточный сток формируется за счет склонового стока при его поверхностном задержании в понижениях микрорельефа, в лесной подстилке, за счет почвенного стока и верховодки (рис. 2). На гидрографе его обычно объединяют с поверхностным стоком.

В свое время С.Д. Муравейский [86] высказал гипотезу о стоке как о процессе переноса водных масс, обладающих определенной качественной спецификой, в существенной мере обусловленной их происхождением. Например, для верхневолжского бассейна в формировании речного стока принимают участие следующие генетические категории вод [107]: 1) поверхностно-склоновые воды, поступающие в реки по поверх-

ности склонов; 2) почвенно-поверхностные воды, стекающие по микро-ручейковой сети и поступающие в русло из верхнего почвенного слоя; 3) почвенно-грунтовые воды, дренируемые речной сетью из почвенной толщи и из временных водоносных горизонтов; 4) грунтовые воды, поступающие в речную сеть из постоянных водоносных горизонтов; 5) подземные воды глубоких горизонтов.

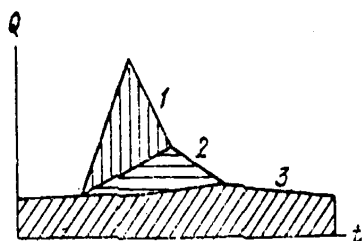


Рис. 2. Схема основных видов стока в русле при половодье и паводках [91]

1 — поверхностный склоновый сток;
2 — промежуточный сток; 3 — подземный сток

Расчеты, выполненные К.К. Эдельштейном и О.Ю. Смахиной [143], свидетельствуют, что сток реки в любом створе есть закономерная смена ее водных масс, в отдельные фазы режима по-разному трансформированных вследствие смещения в различных пропорциях основных генетических типов вод (поверхностно-склоновых, почвенных, грунтовых), свойственных водосбору этой реки. Так, для рек Москвы и Лусянки (Можайский полигон) было показано (в вероятностной форме), что объем и продолжительность периода речного стока, состоящего из приблизительно одинаково пропорциональной смеси вод трех указанных типов, невелики и составляют менее трети годовых величин. Они наблюдаются на стыке основных фаз - межени, половодья, паводков и на растянутом спаде последних. В половодье сток рек формируется преимущественно склоновыми водами, которые в фазу подъема и в фазу спада разбавлены преимущественно грунтовыми водами. Сходен с последними и генетический состав речных вод в зимние и летние паводки, но в это время ведущая роль в разбавлении склоновых вод переходит от грунтовых к почвенным водам. Меженные речные массы включают в основном грунтовые воды.

Общее количество твердых веществ, которые переносит речной поток за определенный промежуток времени, представляет собой твердый сток реки (сток наносов). Различают взвешенные наносы, движущиеся вместе с водой в толще водного потока (речная взвесь), и влекомые наносы, перемещаемые потоком в придонном слое путем волочения или перекачивания по дну. Существует также переходная форма движения наносов - сальтация (скачкообразное перемещение частиц). Между потоком речных (транспортируемых) наносов и речными отложениями (аллювием) существует тесная связь, проявляющаяся в форме направлен-

ного обмена частицами (веществом), который, в зависимости от определяющих факторов, протекает с большей или меньшей интенсивностью и может быть сбалансированным или несбалансированным [82]. В идеале в первом случае объем осаждающихся и вовлекаемых в движение частиц одинаков. Во втором - он различен и характеризуется либо преимущественным переходом осадочного материала во взвешенное или влекомое состояние, либо его систематической аккумуляцией.

Эрозионные и русловые процессы, по-разному проявляясь в различных звеньях гидрографической сети, тем не менее обладают определенной схожестью, сущность которой раскрыта в следующих законах [19, 79]:

1) закон взаимной обусловленности водного потока и русла (если последнее способно деформироваться);

2) закон нелинейности связи (непропорциональности) между количественными изменениями активных факторов русловых процессов с интенсивностью их проявления;

3) закон факторной относительности - неодинаковой или неодновременной реакции (в отношении направленности и интенсивности русловых и эрозионных процессов) в различных звеньях гидрографической сети на изменение условий географической среды;

4) закон ограниченности морфологических комплексов - наличия вполне определенных типов форм флювиального рельефа, характеризующихся устойчивостью при стационарном режиме эрозионного и руслового процессов.

Н.И.Маккавеев, создавший учение о едином эрозионно-аккумулятивном процессе как явлении, связанном с работой водных потоков на поверхности суши, особо подчеркивал, что наряду с указанными законами при изучении русловых процессов следует учитывать то, что в ходе их развития одновременно проявляются, тесно взаимодействуя друг с другом, как размыв, так и аккумуляция наносов, которые практически всегда взаимно связаны, или, по словам Н.И. Маккавеева, без предварительной эрозии не происходит аккумуляции [81]. В сущности, подчеркивает ученый, оба эти процесса настолько переплетены, что по длине водотока трудно разграничить зоны «чистой» эрозии и «чистой» аккумуляции. Обычно удается констатировать лишь преобладание того или иного процесса.

В настоящее время существуют два основных подхода к разработке теории русловых процессов: гидродинамический и гидролого-морфологический. Гидродинамический подход основан на применении системы уравнений сохранения энергии и массы для жидкого и твердого потоков к решению проблемы расчета русловых деформаций, и в существенной мере направлен на изучение физических механизмов взаимодействия водных потоков и наносов, перемещаемый во взвешенном и влекомом состоянии. Некоторые сторонники гидродинамического на-

правления теории руслового процесса при анализе явлений не выделяют донные (русловые) отложения в особую категорию; основными вопросами часто являются оценки суммарной мутности потока, размеров глубинной эрозии и аккумуляции транспортируемых рекой наносов. Гидролого-морфологическое направление теории руслового процесса основано на типизации морфологически однородных русловых форм на основе крупномасштабных планово-высотных картографических и аэрофото-съемочных материалов и определении средних скоростей их перемещения, используемых при разработке прогнозов русловых процессов. Согласно этому направлению, русловой процесс понимается как непрерывное видоизменение морфологического строения речного русла и поймы, происходящее под действием текущей воды. Именно в ходе таких изменений (русловых деформаций) осуществляется перераспределение осадочного материала, т. е. русловой процесс, по сути, является внешним выражением, а главной задачей является изучение динамики русловых форм. При этом развитие малых и средних русловых форм непосредственно связано с расходом твердых (донных) наносов, с кинематической структурой потока и с его макротурбулентностью. Обоснование Н.Е.Кондратьевым [111] принципа дискретности позволило аргументировать пределы применения каждого из названных подходов к изучению русловых процессов: использование гидродинамического подхода наиболее эффективно на низших структурных уровнях (уровень перемещения русловых микроформ); гидролого-морфологического - на структурных уровнях русловых мезо- и макроформ.

В свое время В.Г. Глушковым был обоснован принцип, указывающий на необходимость рассматривать гидрологические процессы и явления в тесной связи с физико-географическими условиями, в которых они формируются (с климатическими, геологическими, почвенными и другими). Предметом подобных географо-гидрологических исследований, тесно сопрягающегося с гидролого-морфологическим подходом, являются закономерности изменчивости характеристик стока наносов на глобальном, региональном, локальном уровнях в геологических, исторических и реальных масштабах времени [3]. Важное место в них занимают проблемы территориальной изменчивости характеристик стока наносов, выявления их региональных зависимостей от определяющих факторов. Главным итогом изучения пространственной дифференциации характеристик стока является закон географической зональности их распределения.

В последние годы усилия специалистов направлены на разработку концепции, объединяющей гидролого-морфологический (географо-гидрологический) и гидродинамический подходы к исследованию процессов движения речных наносов и формирования речных отложений. По мнению Н.И. Алексеевского [3], она (концепция) должна учитывать физические, генетические и географические особенности возникновения и

трансформации потоков осадочного материала в водных объектах на локальном, бассейновом, региональном и глобальном уровнях. Важнейшими предпосылками для ее обоснования являются [3]: 1) географическая обусловленность пространственно-временной изменчивости стока наносов, 2) разномасштабность эрозионно-аккумулятивных процессов, 3) общность и специфика процессов формирования и перемещения осадочного материала в различных эрозионно-аккумулятивных системах, 4) генетическое обновление транспортируемого материала, 5) структурность форм перемещения влекомого наносов, 6) гидродинамическое регулирование характеристик стока наносов, 7) единство физических и гидролого-географических закономерностей формирования и перемещения наносов. В связи с этим, считает Н.И. Алексеевский, значение получают проблемы типизации так называемых эрозионно-аккумулятивных систем, в структуре которых различают следующий иерархический ряд: элементарный склон - овражно-балочная сеть - речной бассейн - область внутреннего стока - материк - поверхность суши в целом.

Эрозионно-аккумулятивные процессы в бассейнах и руслах равнинных рек

Водные потоки - важнейший фактор формирования рельефа земной поверхности. Их принято делить на нерусловые склоновые, временные русловые (текущие в оврагах и балках) и постоянные русловые (реки). Мощность водного потока зависит от его скорости, а последняя - от уклона и количества протекающей воды. В водном потоке происходит совместное гравитационное движение двух фаз - жидкой и твердой, и характерно преимущественно турбулентное движение, выраженное в образовании восходящих спиральных завихрений. В ходе переноса потоком твердых частиц осуществляется не только постепенная сортировка последних по размерам, но и их физико-химическая дифференциация.

Общая характеристика русловой сети и водных потоков

В современной гидрографической (русловой) сети А.С. Козменко выделяет следующие основные звенья, которым соответствуют определенные виды эрозии и руслового процесса (рис. 3). Верхние звенья гидрографической сети - ложбины, лощины и суходолы, составляющие более 90% ее длины, являются областями формирования жидкого и твердого стока постоянных и временных водотоков [91]. На поверхности

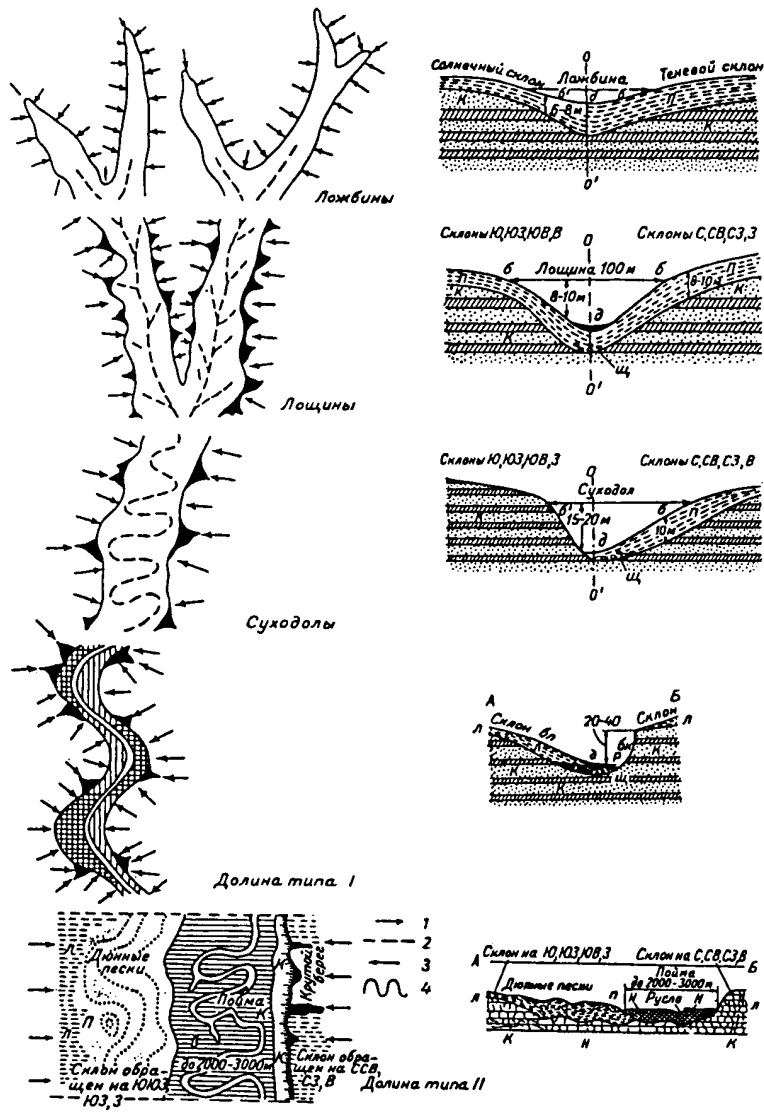


Рис. 3. Схема основных звеньев гидрографической сети и видов эрозии [121]

I – основные звенья сети и виды эрозии и руслового процесса: 1 – плоскостной смыв, 2 – донный размыв, 3 – береговой размыв, 4 – русловый процесс; II – поперечные разрезы основных звеньев гидрографической сети: n – покровная порода, K – коренная порода из наносов и щебня, O-O – середина первичного промыва, δ – дно современных звеньев, б – середина первичного промыва.

водосбора, занятого этими звеньями гидросети, происходят необратимые процессы плоскостного смыва, берегового и донного размыва горных пород и вынос осадочного материала текучими водами. Нижние звенья гидрографической сети - речные долины - в основном служат главными путями транспорта поступающего материала, а также обстановками наиболее активного формирования аллювиальных отложений. Объем (W) эрозионной (русловой) сети может быть вычислен по формуле К.К.Эдельштейна (1980): $W = (L \times H / 6) \times (B+2b)$, где L – длина водотока, B – его ширина в устье, b – ширина вблизи от истока, H – глубина эрозионной формы в устье.

Река представляет собой естественный водный поток, текущий в выработанном им русле и питающийся за счет поверхностного и подземного стока воды с его водосборного бассейна. Минимальная величина годового слоя осадков, необходимая для образования рек, приблизительно составляет в средних широтах 250 мм, в субтропиках - 500, в тропиках – 700 - 1000 мм [82]. Реки, сливающиеся вместе и выносящие свои воды в виде общего потока, образуют речную систему. Часть земной поверхности с уклоном к одному определенному пункту, дренируемая речной системой, представляет собой водосбор, или водосборный (речной) бассейн. Кроме поверхностного водосбора выделяют также подземный водосбор, т.е. толщу почв и горных пород, питающую водой водотоки. Основными морфометрическими характеристиками водосбора являются площадь, длина, средняя высота, средний уклон, средняя длина склонов, коэффициенты лесистости, заболоченности, озерности, распаханности и т. д. От размера и характера водосбора во многом зависят степень равномерности стока воды и количество ландшафтных зон, которые входят в границы данного речного бассейна. Подавляющее большинство малых бассейнов располагается в пределах только одной ландшафтно-географической зоны. В общем случае, чем больше площадь водосбора, тем равномернее сток реки и тем меньшую эрозионно-транспортную работу выполняет единица объема воды [131].

В настоящее время наиболее известны две классификации притоков в пределах какой-либо речной системы - нисходящая и восходящая. Недостатком первой, в которой счет притоков идет от главной реки, является включение в один порядок притоков различной категории. Более распространенной является восходящая классификация Р.Е. Хортонa [130], в которой порядок устанавливается в направлении от истоков к устью главной реки. При этом порядок реки увеличивается на единицу только после слияния двух рек одного порядка. Так, за реку первого порядка принимается река, не имеющая притоков. Река 2-го порядка образуется при слиянии двух рек 1-го порядка, причем второй порядок распространяется на одну из слившихся рек (как правило, наибольшую) до ее истока, и т.д. Если сливаются реки разных порядков, то после их слия-

ния порядок реки не меняется, а сохраняется наибольший порядок одной из слившихся рек. Таким образом, по номеру порядка реки можно судить о ее длине, площади водосбора, водоносности и многих других характеристиках (табл. 4). Например, на Русской равнине XIII порядок в устье имеют реки Ока, Дон, Днепр; XIV - р. Кама ниже впадения в нее р. Белой, XV порядок - р. Волга ниже впадения в нее Камы. Установлена интересная природная закономерность в структуре речной сети - так называемый закон строения речной сети, в соответствии с которым фиксируется прогрессивное увеличение количества рек в зависимости от их длины, или ранга, определяемого порядком впадения в главную реку. Число рек по мере уменьшения их длин возрастает в геометрической прогрессии со знаменателем около 3 (обычно его значения колеблются от 2,5 до 3) [108]. Средние значения для коэффициентов увеличения площади водосбора и длины реки при переходе от потоков меньших порядков к потокам больших порядков оцениваются соответственно в 2,72 и 1,64; коэффициент изменения среднесуточного расхода воды для рек смежных порядков составляет 2,78.

Густота речной сети (т. е. длина речной сети, приходящаяся на 1 км² площади водосбора) во многом определяет условия стока атмосферных осадков и питания грунтовыми водами; зависит она главным образом от климата, геологического строения и рельефа местности и в значительной степени является производной географической зональности. Как следует из табл. 5, в зональном плане наиболее изменчива густота речной сети в пределах водосборов малых рек, тогда как в масштабах более крупных бассейнов она практически не меняется. Таким образом, региональные (зональные) различия густоты речной сети во многом обусловлены интенсивностью развития малых рек.

Важнейшим морфологическим выражением речной сети являются речные долины, представляющие собой закономерно построенные геолого-геоморфологические комплексы, состоящие из дна (ложа), склонов, террас, поймы (т. е. террасы, периодически заливаемой водой во время половодья или паводков), русла (части дна долины, занятой речными водами). Зона или линия, соединяющая самые глубокие точки долинного ложа (русла), называется тальвегом, который обычно совпадает с направлением линии наибольших поверхностных скоростей течения речного потока. Основными морфометрическими характеристиками речной долины являются ее ширина, длина, глубина вреза, количество, высота и ширина террас, уклоны склонов и дна, высота и ширина поймы, площадь поперечного сечения. Принято различать долины равнинных, полугорных и горных рек. Для большинства равнинных рек наиболее распространенной формой (по характеру поперечного профиля) являются ящикообразные долины, хотя у самых малых водотоков широко развита V-образная форма долины.

Таблица 4. Гидрографические, гидрологические и морфологические характеристики потоков речной системы [108]

Характеристики	Порядок (класс) речных потоков														
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV
Длина рек (от истоков), км	0,80	1,5	2,8	5,1	9,3	16,9	31,0	57,0	104	190	338	620	1140	2090	3810
Длина потоков, км	0,388	0,71	1,3	2,3	4,2	7,6	14,1	26,0	47	86	148	282	520	950	1720
Линейная площадь водосбора, км ²	0,15	0,21	0,31	0,44	0,64	0,92	1,33	1,91	2,75	3,96	5,7	8,2	11,8	17,0	24,5
Средний многолетний расход воды, Q, м ³ /с	0,0039	0,011	0,03	0,088	0,25	0,71	2,0	5,65	16,0	45	128	363	1025	3000	8500
Средний максимальный расход воды, Qm, м ³ /с	0,50	1,12	2,51	5,60	12,6	28,2	63	141	316	710	1590	3560	7960	17800	40000
Отношение Q/Qm	128	102	81	64	50	40	31	25	20	15,7	12,4	9,8	7,7	5,9	4,7
Продолжительность половодья, сутки	0,01	0,1	0,4	1,0	2,1	4,7	7,2	10	17	21	29	40,0	52	70	90
Относительная глубина меженного русла, h/b	0,173	0,098	0,061	0,042	0,031	0,024	0,019	0,017	0,015	0,013	0,012	0,011	0,011	0,010	0,010
Ширина меженного русла, м	0,26	0,69	1,6	3,5	7,0	13,3	24	42	70	114	182	283	433	658	1000
Продольный уклон русла, ‰	134	49	20	8,9	4,2	2,2	1,1	0,63	0,36	0,21	0,13	0,079	0,049	0,03	0,02

Таблица 5. Средние значения густоты речной сети в пределах европейской части быв. СССР [90]

Ландшафтная зона	Длина рек, км			Вся речная сеть
	до 10	10-100	более 100	
Тундра	0,27	0,18	0,06	0,51
Лесная	0,32	0,19	0,06	0,52
Лесостепная	0,19	0,13	0,06	0,38
Степная	0,10	0,11	0,06	0,27
Полупустынная	0,08	0,10	0,05	0,23

Классификация равнинных пойм на морфологической основе была предложена Р.А. Еленевским [38], согласно которой наиболее типичной и распространенной их группой является группа сегментных пойм, характерных для меандрирующих рек. Схема морфологического строения поймы разработана В.Р. Вильямсом. В общем случае на достаточно хорошо развитых поймах относительно неплохо обособляются три их основные части: 1) прирусловая, 2) центральная и 3) притеррасная (рис. 4).

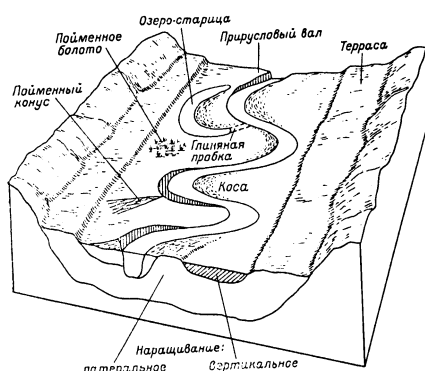


Рис. 4. Блок-диаграмма строения долины меандрирующей реки (Vanoni, 1971; Gregory, Walling, 1973 [105]).

Прирусловая пойма по сути представляет собой узкую пониженную песчаную полосу - прирусловую отмель, которая

отделяется от центральной поймы прирусловыми валами, являющихся водно-аккумулятивными образованиями. Центральная пойма характеризуется своеобразным рельефом и обычно представляет собой пониженные участки, где грунтовые воды могут подходить достаточно близко к поверхности. Именно в этой части поймы наиболее чаще развиты плодородные аллювиальные и аллювиально-луговые почвы. Притеррасная пойма нередко отделена от центральной притеррасными валами, представляющими собой более древние прирусловые валы. Между этими валами и коренным берегом (подножием террасы) располагается пониженная часть поймы, которая отличается более тяжелыми по механическому составу почвами, устойчивым водным режимом и часто избыточным увлажнением, нередко здесь расположены старицы. У многих рек притеррасная пойма может совершенно от-

существовать. Как правило, такое деление поймы ясно выражено лишь при их хорошем развитии, особенно у средних и крупных рек. В поймах самых малых рек такой дифференциации чаще всего не бывает. По сторонам поймы может быть ограничена или коренными берегами, или уступом первой надпойменной террасы, или, если последняя была целиком размыта, уступом какой-либо из вышележащих террас. Обычно счет террас ведут от более молодых к более старым (т.е. снизу вверх). Их число варьирует в пределах 2-10 и более. Естественно, что максимальные значения характерны для наиболее крупных рек, террасы которых могут достигать десятков километров в ширину.

Русло реки, т.е. выработанное речным потоком ложе, по которому осуществляется сток речных вод без затопления поймы, - важнейший элемент речной сети. Его формирование начинается с момента появления постоянного водотока. По определению Н.И. Маккавеева, к типу русловых следует отнести потоки, глубина, ширина и скорость течения которых настолько значительны, что основными динамическими факторами, определяющими главные закономерности эрозионно-аккумулятивной деятельности этих потоков, являются силы, возникающие при поступательном движении воды [79]. Именно эти силы и определяют непрерывное взаимодействие потока и русла, образующих вместе единый морфологический комплекс специфических отложений и форм рельефа. Различают коренное (меженное) и пойменное (паводочное) русла. Морфологический облик русел рек и вид горизонтальных русловых деформаций, проявляющийся в формах самого русла, позволяют выделить три основ-

ные разновидности русел: меандрирующие, разветвленные на рукава и неразветвленные, относительно прямолинейные (рис. 5).

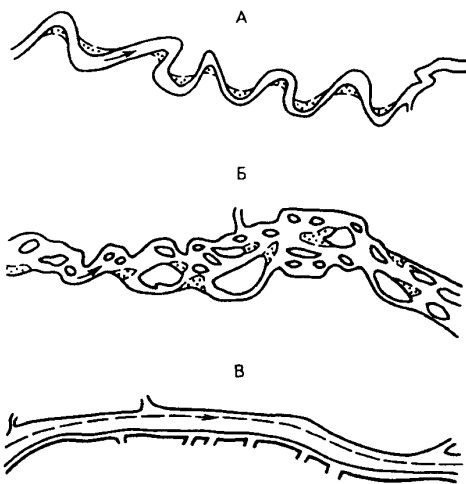


Рис. 5. Главные разновидности русел равнинных рек [82]

А - извилистое (р. Кеть), Б - разветвленное (р. Яна), В - прямолинейное неразветвленное (р. Лена)

Любая река и ее русло обладают специфическими морфометрическими характеристиками, важнейшими из которых являются длина, коэффициент извилистости, или развитие реки (отноше-

ние длины реки к длине прямой линии, соединяющей исток и устье, при относительно постоянном направлении течения). Как правило, значения коэффициентов извилистости большинства малых рек колеблются в пределах 1,5-2,2.

Многие гидрологические особенности рек определяются характером их продольного профиля. При этом различают продольный профиль русла (уклон дна русла), т.е. линию пересечения дна реки вертикальной плоскостью, проходящей через фарватер, и продольный профиль водной поверхности (уклон водной поверхности), т.е. линию пересечения водного зеркала реки вертикальной плоскостью, также проходящей через фарватер. Как правило, продольный профиль дна русла не похож на продольный профиль водной поверхности реки. Последний редко имеет перегибы уклона и никогда не имеет обратных уклонов. На практике, используя термин «продольный профиль реки», обычно подразумевают под ним профиль водной поверхности.

Уклон дна и водной поверхности реки выражается отношением падения реки на каком-либо участке (т.е. разности отметок дна или водной поверхности) к длине этого участка по линии фарватера в виде десятичной дроби или в промилле. Уклон продольного профиля реки в любом месте меняется в зависимости от колебаний стока воды и происходящих в русле деформаций. Как правило, средние значения уклонов крупнейших равнинных рек невелики и довольно близки между собой. Так, средний уклон Оби - 0,04%, Днепра и Оки - 0,11%, Дона - 0,09%, Сев. Двины - 0,07, Волги - 0,07 [120]. Малые реки отличаются большими уклонами; для них характерны и более резкие изменения их значений в пространственном отношении. Например, малые реки, берущие начало на водораздельных возвышенностях Русской равнины, часто имеют здесь уклоны в 1-1,5% и более, тогда как на равнинных участках они колеблются в пределах 0,4-0,8%. Форма продольного профиля и распределение значений уклона постоянно меняются благодаря вертикальным деформациям, обусловленным различными факторами. Так, аккумуляция осадочного материала вызывает повышение дна русла и подъем уровня воды в реке, вследствие чего уклон русла возрастает. На форму продольного профиля реки и направленность его развития большое влияние оказывает свойство потока постепенно выравнивать удельную транспортирующую способность по длине русловой системы, что приводит к формированию так называемого выработанного продольного профиля, т.е. профиля, имеющего сравнительно стабильную форму.

Главными динамическими факторами, определяющими основные закономерности эрозионно-аккумулятивной деятельности рек, являются силы, возникающие при поступательном движении воды [13, 19, 33, 82, 85, 109, 158]. Как известно, различают два режима ее движения - ламинарный (линии тока параллельны, вихри не образуются) и турбулентный (отлича-

ется беспорядочным, хаотичным, вихревым движением частиц жидкости). Оба режима характеризуются безразмерным параметром Рейнольдса (числом Re). Для ламинарных потоков его значение меньше 2300, в турбулентных оно всегда больше этой величины. Еще один относительный безразмерный параметр, который применяется для ламинарных или турбулентных потоков со свободной поверхностью или с внутренней границей, в которых для возникновения течения существенную роль играет сила тяжести, получил название числа Фруда (Fr). При его значении более единицы поток является бурным, если оно менее единицы, то такой поток называется спокойным. Принципы расчета и применения указанных показателей приводятся в литературе (см., например, [82, 131]). Для определения средней скорости течения используется известная формула Шези.

Речные русла представляют собой открытые русла, движение воды в которых осуществляется под действием силы тяжести (так называемое безнапорное течение воды). Такие русла характеризуются наличием свободной поверхности потока, т.е. границы раздела вода/воздух. Главными гидравлическими и морфометрическими характеристиками потока являются ширина и глубина русла, площадь его живого сечения, смоченный периметр, гидравлический радиус, уклон свободной поверхности, скорость течения (табл. 6), коэффициент шероховатости ложа и др. Движение воды в реках практически всегда носит неустановившийся характер, что связано с постоянной пульсацией скоростей течения, отличающихся, как правило, турбулентным характером, но при этом, несмотря на изменения величин и даже направления движения скорости, в каждой данной точке направление поступательного движения всего потока сохраняется постоянным.

Таблица 6. Скорости течения рек в половодье и в меженный период [104]

Реки	Средняя скорость течения, м/с	
	в половодье	летом
Большие равнинные (Волга, Днепр)	1,7 - 2,5	0,8 - 1,0
Средние равнинные (Ока, Москва)	1,5 - 2,0	0,5 - 0,6
Малые равнинные	1,2 - 1,5	0,4 - 0,5
Малые горные	5,0	1,0
Небольшие полугорные	3,0	1,5

Движение турбулентного потока сопровождается пульсацией ряда его характеристик, обусловленных особенностями структуры потока, представленной совокупностью различных по размеру, непрерывно перемещающихся и беспорядочно ориентированных вихрей. На общее поступательное (безнапорное) движение речного потока накладываются беспорядочные турбулентные движения различного пространственного (продольного, вертикального и поперечного) масштаба, соотношения между которыми определяют особенности вихревых структур [34, 109].

Особенно интенсивно они развиваются на участках искривления струй потока: в излучинах, при разветвлении потока на рукава, при слиянии водотоков, обтекании островов и т.п. Рассмотренные характеристики в большей степени относятся к достаточно широким руслам (значения относительной ширины, т.е. отношения ширины к глубине, как правило, не менее 30). Течение в руслах малой ширины обладает рядом особенностей, связанных с влиянием берегов на структуру потока и его сопротивления [28]. Одной из важнейших кинематических особенностей таких потоков является заглупление динамической оси потока по уровень свободной поверхности, что связано с тормозящим действием прибрежных частей русла.

Турбулентность речного потока считают фактором, определяющим внутренний механизм руслового процесса, что, в свою очередь, обеспечивает постоянное взаимодействие водного потока и русла, образующих единый комплекс. Для нормального функционирования этого комплекса в реку должны поступать воды (дождевые, талые, подземные), причем в таком количестве и с таким распределением во времени, чтобы быть достаточными, во-первых, для поддержания постоянного водного стока, во-вторых, чтобы обеспечивать транспорт (сток) наносов, поступающих в водоток [82]. Соотношение между эрозионной деятельностью на водосборе и транспортирующей способностью водного потока, в существенной мере зависящей от его гидравлических характеристик на конкретном участке реки (Кондратьев, 1999), определяет направленность и интенсивность накопления в реках продуктов эрозии. Транспортирующей способностью называется такой предельный расход наносов, сверх которого поток при заданных гидравлических характеристиках перемещать твердый материал не способен. На практике в качестве показателя транспортирующей способности принимается соответствующая ей средняя мутность водного потока.

Питание рек осадочным материалом

Как отмечалось выше, речной сток представляет собой процесс переноса водных масс, в конкретной точке и в данный момент времени характеризующихся определенной генетической структурой. В сущности, аналогичный подход к анализу процессов формирования стока наносов (твердого стока рек) использует Н.И. Алексеевский [3]. Он выделяет две генетических составляющих в транспортируемом рекой осадочном материале, одна из которых связана с внешними, другая - с внутренними источниками формирования стока наносов. Внешние генетические составляющие стока твердых наносов представляют собой часть переносимого рекой осадочного материала, поступающего с водосборной территории

(так называемая бассейновая, или транзитная, составляющая наносов). Внутренние составляющие связаны главным образом с размывом ранее накопившихся речных отложений и в существенной степени являются следствием возникновения направленного массообмена в системе поток-русло (русловая составляющая стока наносов). Сток влекомых частиц характеризует в основном перенос собственно русловых отложений. Соотношение русловых и транзитных фракций в составе взвешенных наносов колеблется в достаточно широком диапазоне, определяется интенсивностью взаимодействия потока и русловых отложений (гидравлическими факторами) и масштабами поставки материала внешними источниками осадочного материала. С ландшафтно-географической точки зрения в направлении с севера на юг отмечается увеличение доли транзитных наносов в составе переносимого реками осадочного материала. Так, доля транзитных наносов в составе взвеси в таежных реках составляет 1-74%, в реках лесостепной зоны 74-87%, степных реках 79-97% [35]. В свою очередь, в структуре стока взвешенных наносов выделяется ряд генетических составляющих, значимость и соотношение которых изменчивы и, судя по всему, зависят от характеристик реки и разнообразных природных (а сейчас и техногенных) факторов. Существующие данные, как подчеркивает Н.И.Алексеевский [3], позволяют лишь в общих чертах охарактеризовать генетические составляющие стока взвешенных наносов (табл. 7).

Таблица 7. Генетические составляющие стока взвешенных наносов (обобщение данных, приводимых в [3])

Коэффициент генетической значимости	Значения коэффициента
процессов смыва почв на водосборах	0,06 – 0,70
овражной эрозии на склонах речных долин	0,02 – 0,53
обвально-осыпных процессов	0,012 – 0,304
селей	0,07 – 0,80
оползневых процессов	0,0005 – 0,90
крипа	0,004 – 0,10
эрозионных процессов в руслах рек	0,02 – 0,74
размыва берегов	0,01 – 0,64

Примечание. Значения коэффициента генетической значимости могут изменяться от 0 до 1, а с учетом процессов аккумуляции наносов в русле и на пойме - от -1 до +1. Последние процессы в природных условиях являются единственными, которые снижают содержание в потоке взвешенных веществ. В техногенных условиях к ним присоединяется еще ряд явлений, способствующих изъятию взвеси из миграционного потока (например, забор речной воды на различные нужды и т. д.).

А.П. Дедков и В.И. Мозжерин [35] для выявления роли отдельных факторов в изменении интенсивности денудации по земному шару применили информационный анализ. Они установили, что по величине коэффициента эффективности приема и передачи информации в однофакторном канале связи проанализированные факторы располагаются в следующей последовательности: ландшафтная зональность - 0,12, релье-

еф - 0,08, состав пород - 0,07, площадь бассейна - 0,03, антропогенное воздействие - 0,02. Роль жидкого стока из-за недостатка данных авторам оценить не удалось.

Эрозионные процессы на водосборах являются важнейшими факторами поступления в реки осадочного материала и соответственно развития речных русел и формирования русловых отложений. Интенсивность эрозии зависит от характера рельефа и почвенно-растительного покрова, состава горных пород, количества и вида атмосферных осадков, величины и режима стока, темпов инфильтрации и т.д. По генезису временных водных потоков, вызывающих поверхностную эрозию, можно выделить следующие ее основные типы: от стока дождевых вод, от стока талых вод, от стока вод орошения, от стока поливочно-моечных вод. Эрозионная активность талого стока во многом определяется условиями его формирования. Сильное влияние на весенний смыв почвы оказывает глубина промерзания и влажность грунта, запас воды в снеге, наличие ледяной корки на поверхности почвы, режим погоды, в том числе интенсивность дождей в период снеготаяния. Как правило, смыв почвы талыми водами подвержен более значительным колебаниям в многолетнем разрезе, нежели смыв ливневым (дождевым) стоком [51, 52]. Существенные различия в интенсивности смыва почвы талым стоком свойственны и отдельным фазам снеготаяния. Очевидно, что интенсивность смыва почвы в периоды снеготаяния в силу различных причин уступает смыву почвы во время дождливых периодов.

В общем случае поверхностную эрозию разделяют на пластовую и линейную, которые, по образному выражению М.Н. Заславского, соответствуют действию наждака и пилы. По соотношению темпов эрозии почв и почвообразования поверхностную эрозию разделяют на нормальную и ускоренную [42, 43]. Нормальная эрозия наблюдается в тех случаях, когда смыв верхнего слоя почвы превышает накопление в ней гумуса в процессе почвообразования; при ускоренной эрозии потери гумуса не компенсируются почвообразовательными процессами. Считается, что скорость наращивания гумусового горизонта у большинства почв колеблется в пределах 0,2-0,5 мм/год [42], т.е. если интенсивность смыва не превышает указанных величин, то мы наблюдаем нормальную эрозию. Оценка интенсивности эрозии дается обычно по величине слоя ежегодно смываемой почвы или по объему (весу) почвы, удаляемой с единицы площади (табл. 8). Поскольку сейчас естественные условия развития эрозионных процессов на многих территориях нарушены (распашка склонов, замена природного растительного покрова культурными растениями, выпас скота и т.п.), то это часто приводит к развитию ускоренной эрозии. Как правило, последняя наблюдается при крутизне склонов свыше 3-5°, достигая наибольшей интенсивности при крутизне свыше 12-15°.

Отрыву частицы от поверхности ложа потока и приведению ее в движение в основном препятствуют два фактора [Маккавеев, Чалов]: сила тяжести, действующая на частицу, нормальная к поверхности дна, и сила сцепления между частицами. Важным фактором, обуславливающим интенсивность эрозионных процессов, являются свойства почво-грунтов, подстилающих текущую воду. Различают несвязанные грунты (со средним размером частиц $> 0,05$ мм) и связанные грунты ($< 0,05$ мм). Несвязанные грунты делятся на крупнообломочные и песчаные; в группе связанных грунтов выделяют пластичные (вязкие) и скальные [82]. Количественным выражением противозерозионной устойчивости грунтов являются критические скорости течения - неразмывающая скорость и размывающая скорость. Первая представляет собой предельную скорость, при которой основная масса частиц еще сохраняет состояние покоя, вторая - отвечает началу массового переноса (срыва) частиц. Схема районирования равнинных областей европейской части быв. СССР по размываемости поверхностных толщ горных пород включает 10 категорий пород (объединенных в три комплекса), различающихся величиной размывающей скорости (табл. 9).

Таблица 8. Количественные показатели ускоренной эрозии почв

Интенсивность эрозии	Показатели смыва	
	мм/год (по Н.К. Шикеле и др.)	т/га (по М.Н. Заславскому)
Слабая	менее 0,5	менее 5
Средняя	0,5-1	5-10
Сильная	1-2	10-20
Очень сильная	2-5	20-50
Катастрофическая	более 5	более 50

Таблица 9. Группировка горных пород по неразмывающей скорости [144]

Горные породы	м/сек
I. Комплекс рыхлых пород	0,3 – 2,0
Пески разномерные	0,3 – 0,55
Лессы, супеси, легкие суглинки	0,65 – 0,75
Суглинки, безвалунные связные	0,55 – 1,0
Суглинки тяжелые валунные, морена	1,0 – 1,3
Глины плотные, твердые	1,0 – 1,5
Щебнистые, гравелистые, холщеватые грунты	1,5 – 2,0
II. Комплекс плотных осадочных и мерзлых пород	2,0 – 6,0
Мягкие осадочные породы: мергели, сланцы, глины и др.	2,1 – 3, 1
Известняки	2,5 – 4,5
Песчаники и мерзлые рыхлые породы	4,0 – 6,0
III. Комплекс скальных кристаллических пород	16,0 – 25,0

Еще одним показателем, от которого зависит величина коэффициента поверхностного (склонового) стока, является водопроницаемость почв и грунтов [103]. Наибольшей водопроницаемостью обладают пески

и песчаные почвы. Примесь в песке тонких частиц значительно снижает фильтрацию. Огромную роль играет структурно-агрегатное строение почв. В частности, почвам с тяжелым механическим составом, но хорошо оструктуренным, свойственна лучшая водопроницаемость. Для территории России характерно увеличение водопроницаемости почв с севера на юг. Г.В. Лопатин [77] на основе анализа большого фактического материала показал, что влияние растительного покрова водосборов на количество переносимого реками твердого материала прослеживается более отчетливо, нежели влияние характера покровных пород и орографии местности. И.П. Ковальчук [51] показал, что в Зап. Подолии поверхностный сток осуществляется в форме сплошного пластового, микроструйчатого (сконцентрированного в сети водороев), пластово-микроструйчатого (пульсирующего). Пластовому стоку соответствует селективный смыл почвы (избирательный вынос наиболее мелких частиц), а микроструйчатому - тотальный, интенсивный смыл (сплошное или концентрированное удаление верхнего слоя почвы и образование густой сети эрозионных борозд). Пластово-микроструйчатый сток вызывает как интенсивный смыл, так и аккумуляцию части продуктов эрозии. Очень часто важную роль играет движение воды в пределах почвенных слоев - так называемый сквозной (подповерхностный) сток, с которым связан особый вид эрозии - подповерхностный смыл. Дождевые осадки в определенных условиях также оказывают непосредственное эродирующее действие, вызванное ударным воздействием капель дождя на почву или на слой воды на ее поверхности (так называемая капельная эрозия).

Ручейковая эрозия, возникающая на склонах, способствует превращению первичного склонового стока в линейный (русловой) сток, формирующий овраги. В данном случае поверхностные потоки выполняют три основные функции [82]: 1) размыв горных пород в русле, углубление оврага и расширение его днища; 2) стимулирование гравитационных процессов на склонах и в вершине оврага под влиянием глубинной и боковой эрозии; 3) вынос из оврага продуктов разрушения, поставляемых эрозионными и склоновыми процессами. Воздействие летних ливней играет более значительную роль в формировании оврагов, нежели талый сток, поскольку в течение одного летнего ливня за несколько часов из оврага может выноситься больше материала, чем за десятки лет потоками талой воды. Это во многом связано с тем, что временные потоки в оврагах отличаются выраженной резкостью дождевых паводков и волновым характером движения воды на их подъеме. Развитие оврага как линейной эрозионной формы происходит до определенных размеров, поэтому вершины его не достигают водоразделов, а протяженность оврагов обычно составляет от 30 до 80% длины склонов [82]. Как правило, овражная сеть тем гуще, чем больше уклоны поверхности, интенсивнее и обильнее осадки и хуже инфильтрационные свойства почвогрунтов. В ходе своего развития овраг способен

трансформироваться в балку, на дне которой в силу различных причин может образоваться донный овраг, иногда полностью поглощающий ее. Балка может также образоваться в результате прекращения постоянного течения в небольших речках. В гумидных условиях для преобразования оврага в балку требуется несколько десятков лет, в аридных районах - тысячелетия.

Одним из показателей развития поверхностной эрозии является потенциал дождевых осадков (ЭПО), абсолютная величина и географическое распределение которого во многом определяют ее интенсивность и пространственные особенности [103]. Для оценки ЭПО применяют в различном сочетании такие основные характеристики дождей, как слой осадков, интенсивность и энергия. В частности, было установлено, что произведение энергии дождя на его максимальную 30-минутную интенсивность тесно коррелирует со смывом. Кроме того, средняя продолжительность времени склонового добегающего поверхностного стока для пахотных склонов, например, в степной зоне составляет около 30 минут, а максимальная 30-минутная интенсивность дождя обнаруживает наиболее тесную корреляцию с максимальной интенсивностью за любые иные отрезки времени. Поэтому 30-минутная интенсивность является достаточно показательной характеристикой возможности развития эрозии в теплую часть года для различных физико-географических условий. На территории России значения ЭПО изменяются в широких пределах и зависят как от количества, так и от интенсивности дождей. Например, по меридиану Архангельска с севера на юг, вплоть до Ростова-на-Дону, они возрастают от 1,8 до 7-8 единиц. Показательно, что в данном случае количество осадков практически не изменяется, но в Ростовской области значительная часть осадков выпадает в виде ливневых дождей. Еще одним показателем, который используется при оценках факторов эрозии, является эрозионный потенциал рельефа (ЭПР), т. е. комплекс свойств рельефа, способствующих возникновению стока, его концентрации и быстрому стеканию воды, по своей физической сути определяющих энергию потоков [103].

Для эрозионных процессов, развитых в пределах равнинных территорий, характерна определенная широтная зональность, которая, в частности, установлена для Восточно-Европейской равнины, где эрозионно-опасные по условиям рельефа территории распространены от тундры до лесостепи. Аккумуляция, неразрывно связанная с эрозией, также имеет зональные черты [144]. По мнению авторов цитируемой работы, удельная (на единицу длины) аккумуляция осадочного материала в суходольной и речной сети определяется ее протяженностью, типом и густотой растительности, слоем стока и формой гидрографа. В пределах Восточно-Европейской платформы протяженность суходольной сети нарастает, а речной сети уменьшается с северо-запада на юго-восток по мере

увеличения сухости климата. Очевидно, что изменение соотношения суходольной и речной сети в пользу первой будет снижать долю осадочного материала, поступающего в речную сеть. Кольматирующая способность растительности максимальна в лесостепной зоне, уменьшаясь незначительно к северу и более сильно к югу по мере снижения густоты растительного покрова. Также с северо-востока на юго-запад снижается сток и возрастает его неравномерность, т. е. пояс максимальной транспортирующей способности временных русловых потоков приходится на юг лесостепной или степной зон. Наибольшая доля осадочного материала, достигающего речной сети, свойственна лесостепным районам. Доля материала, отложившегося в суходольной сети, судя по всему, прогрессивно увеличивается по мере уменьшения стока и разрежения речной сети.

Основным показателем, отражающим интенсивность поставки продуктов эрозии в реки, является коэффициент редукции, показывающий долю склонового (бассейнового) материала, достигающего речных русел. Известно, что мутность вод склонового (дождевого и талого) стока практически всегда гораздо выше мутности воды принимающей его реки. Поэтому даже в пределах одного и того же водораздела модули стока склоновых наносов, особенно при стоке дождевых вод, на порядок больше, чем модули твердого стока рек [76, 135]. Натурные наблюдения и расчеты показывают, что в виде взвеси реками в среднем переносится не более 6-15% сносимого с водосборов материала, а примерно 85% продуктов эрозии почв и горных пород либо аккумулируются на более выровненных поверхностях рельефа, не доходя до русловой сети (чаще всего), либо оседают в реках, формируя аллювиальные отложения [51, 52, 114, 122, 123]. Значения коэффициента редукции, как правило, увеличиваются от лесной зоны к пустыням, т.е. по мере иссушения климата. Аналогичное зональное распределение характерно и для мутности речных вод (увеличение среднегодовых значений в направлении с севера на юг) [76].

В формировании стока наносов и аллювиальных отложений многих рек определенную роль играют склоновые процессы. По особенностям склоноформирующих процессов С.С. Воскресенский различает следующие группы и виды склонов [24]:

1. Склоны собственно гравитационные: а) обвальные, б) осыпные (камнепады, обломки менее 1 м^3 , обычно с дроблением), 3) лавинные.

2. Склоны блоковых движений горных масс: а) оползневые (смещение блоков пород в десятки м^3 на крутых склонах, б) оползней-сплывов (медленное движение осадочного чехла), в) оплывные, оплывинные (мелкие блоковые оползни), г) отседания.

3. Склоны массового смещения (сползания) чехла обломочного материала: а) солифлюкционные (течение жидко-текучего грунта, скорость мм или см в сек), б) медленной солифлюкции (движение массы

грунта вязко-текучей консистенции, скорость не более 2 м в год), в) тропической медленной солифлюкции, д) конжелифлюкции (движение рыхлых обломочных масс на склонах, обусловливаемое кратковременным, но систематически повторяющимся смещением масс грунта по насыщенному влагой относительно тонкому слою, расположенному над поверхностью мерзлых пород, меняющему свое положение по мере оттаивания), е) дефлюкции, или крипа (движение вязко-пластичной массы под влиянием силы тяжести), ж) десерпции (движение практически сухого обломочного материала – песка, дресвы, щебня – в результате изменения объема при колебаниях температуры).

4. Склоны делювиальные (плоскостного смыва): а) мелкими струями, б) бороздчатый, в) растворимый.

В каждом конкретном случае значимость тех или иных склоновых процессов в поставке осадочного материала в реки может быть различной и часто очень существенной. Максимальная роль осыпных процессов характерна для формирования твердого стока рек аридной зоны. Оползневые процессы обычно значимы для рек гумидной зоны. Наибольшая активность протекания явлений массового и относительно медленного смещения почвогрунтов отмечается в северных и гумидных областях.

Руслоформирующая деятельность рек

Реки характеризуются непрерывным взаимодействием воды и русла. Силы, возникающие при поступательном движении воды, являются важнейшими динамическими факторами, определяющими основные закономерности эрозионно-аккумулятивной деятельности русловых потоков. В общем же случае главными факторами русловых процессов являются сток воды, геологическое строение территории, сток наносов, существующая форма русла и долины, ледовые явления, ветры, растительность, наличие многолетнемерзлых грунтов, специфика проявления склоновых процессов и хозяйственная деятельность человека [82]. Их сложное сочетание определяет характер и направленность так называемых русловых деформаций, представляющих собой непрерывные переформирования русла под действием текучей воды.

Русловые деформации в зависимости от их развития по отношению к направлению силы тяжести и роли в осуществлении эрозии, транспорта и аккумуляции наносов разделяют на три основные группы [82]: 1) вертикальные, вызывающие трансформацию продольного профиля реки и изменения отметок дна русла (врезание или аккумуляция); 2) горизонтальные, связанные с перемещением русла в плане и размывами берегов и приводящие к расширению долины и образованию поймы; 3) движение аллювиальных гряд, обуславливающее формирование перека-

тов, отмелей, кос и других аккумулятивных образований в русле. Для конкретного участка реки по времени своего проявления русловые деформации могут быть направленными, периодическими, текущими (пульсационными) [103] и элементарными (процесс отрыва, перемещения и оседания на дно отдельных частиц) [60]. Каждый из видов русловых деформаций может проявляться по всей реке в целом или на участках значительного протяжения (общие деформации), либо на ограниченных по длине отрезках русла (локальные деформации), в конечном счете образуя сложный комплекс русловых и долинных форм рельефа.

В качестве показателей руслоформирующей деятельности рек, отражающих влияние природных условий водосбора на русловый режим и интенсивность развития процессов эрозии, продукты которых попадают в русло, обычно рассматривают количество и обеспеченность так называемых руслоформирующих расходов, т. е. таких расходов воды, при которых в многолетнем плане переносится максимальное количество наносов, вследствие чего их влияние на формирование русла оказывается наибольшим (иначе говоря, это расходы, при которых наиболее активно происходят русловые деформации) [82]. В зависимости от высоты и продолжительности половодья, степени затопляемости, характера поверхности поймы и состава руслового аллювия руслоформирующие расходы наблюдаются в разные диапазоны уровней и имеют неодинаковую обеспеченность [131]. Как правило, отмечается наличие нескольких руслоформирующих расходов для одного и того же водотока, прохождение которых вызывает специфические изменения в очертаниях русла и поймы. В.С. Боровков [13] полагает, что эти изменения четко не связываются с известными структурными уровнями руслового процесса. По его мнению, водный поток может быть руслоформирующим, если он воздействует на форму русла, производя размывы, либо способствуя накоплению отложений. К.И. Россинский и И.А. Кузьмин [110] непосредственной причиной деформации речного русла считают нарушение баланса наносов, что, например, может наблюдаться в половодье, когда объем транспортируемых рекой наносов значительно увеличивается как вследствие повышения расходов воды, так и в результате возрастания мутности речных вод. В любом случае количество и состав речных наносов - важнейшие факторы, определяющие механизм руслового процесса. Перемещаясь в русле, наносы в конечном счете создают аккумулятивные формы рельефа, вызывают увеличение или уменьшение живой силы потока, обуславливают характер развития эрозионных форм и важнейшие особенности аллювия.

Существует несколько способов интегральной оценки устойчивости русла; известны также различные показатели устойчивости русла и интенсивности русловых деформаций, сущность которых раскрыта в литературе (число Лохтина, коэффициент стабильности русла Маккавеева,

морфометрический показатель для перекатов Шатаевой и др.) [19, 80, 82, 131]. Р.С. Чаловым обоснована классификация участков русла рек (с расходом 1500-3000 м³/с) по степени устойчивости (табл. 10).

Таблица 10. Классификация участков русла рек и перекатов по степени их устойчивости [131]

Характеристика устойчивости	Показатели устойчивости		
	Для участков русла		Для перекатов
	Л	К _с	А
Неустойчивые	< 2	< 6	< 1,4
Слабоустойчивые	2-5	6-15	1,4-1,7
Относительно устойчивые	5-10	15-20	1,7-2,0
Явно устойчивые	> 10	> 20	> 2,0

Примечание. Л - число Лохтина = d/H , где d - средний диаметр частиц донных наносов на участке, мм; H - километрическое падение, м/км; К_с - коэффициент Маккавеева = $d/BJ \cdot 1000$, где B - ширина русла, J - уклон, d - поперечник частиц аллювия, мм; А – морфометрический показатель Шатаевой = $\lg \Delta T / \lg \Delta B$, где T - глубина, B - ширина русла.

Устойчивость отложений, слагающих речное ложе, по отношению к размыву во многом предопределяет возможность изменения руслового рельефа и вторичных преобразований аллювия. С этой точки зрения особую роль играет вода, присутствующая в аллювиальных отложениях. Под действием такой воды в аллювии непрерывно идут процессы, которые могут менять его первоначальный облик. Как показано Л.А. Шимановским [140], механические изменения речных отложений под действием аллювиальных вод обусловлены перемещением минеральных частиц внутри аллювия, изменением его гранулометрического состава и пористости, развитием микроползневых процессов. Наиболее часто встречающимися изменениями аллювия в результате химических процессов, обусловленными деятельностью аллювиальных вод, являются растворение горных пород, слагающих, например, ложе долины или являющихся материальной основой аллювия, растворение, переотложение и цементация рыхлого материала, формирование минеральных новообразований и др. С практической точки зрения обычно различают свободную воду, рыхлосвязанную воду и прочносвязанную с веществом грунта (аллювия) воду, которая не перемещается от одной частицы к другой и может быть удалена лишь с помощью испарения. Рыхлосвязанная вода способна при определенных условиях переходить в обычную свободную воду. В зависимости от влажности речные отложения имеют твердую, пластичную или текучую консистенцию, что во многом определяет их сопротивление размыву. Дополнительным фактором, влияющим на устойчивость аллювиальных частиц, является сила, связанная с динамическим воздействием и направленностью фильтрационного потока. При определенных условиях роль подруслового потока как в переносе твердых частиц, так и рас-

творенных веществ может быть велика. Инфильтрационные потоки из русла в слои грунта увеличивают устойчивость частиц к размыву (способствуют транспорту химических веществ в подрусловые воды); фильтрационные течения из водоносных подрусловых горизонтов в русло реки уменьшают устойчивость частиц к размыву, обуславливают вероятность возникновения суффозии (и содействуют поступлению грунтовых вод в русловые воды).

В речном потоке существует особый вязкий слой, непосредственно примыкающий к его дну (ламинарная пленка), где из-за трения скорости движения сравнительно невелики, а течение сохраняет некоторые характерные признаки ламинарного, когда линии тока воды параллельны и обтекание неровностей ложа происходит без образования вихрей. Данный слой оказывает влияние на динамику всего потока, образование турбулентности, взвешивание и осаждение минеральных частиц [13]. Практически всегда придонная область руслового потока наиболее сильно насыщена взвесью, в составе которой (по сравнению с основной толщей воды) содержится больше грубых частиц. В поперечном разрезе русла мутность воды (относительно среднего по вертикали значения) меняется чаще всего в пределах 0,90-1,10. Верхний слой отложений, энергично участвующих в обмене частицами обломочного материала с транзитным потоком наносов, называется активным слоем русла [48].

Возможность переноса наносов и характер распределения их в толще воды во многом определяются соотношением средней скорости потока и неразмывающей скорости, вертикальной составляющей скорости и гидравлической крупности наносов (табл. 11). Гидравлическая крупность - это скорость равномерного осаждения частиц в неподвижной воде (для ее определения в зависимости от размера частиц используют соответствующие формулы). При малой гидравлической крупности частицы вовлекаются в турбулентное движение водных масс.

Таблица 11. Скорость потока и размер переносимого им обломочного материала [10, 104]

Материал	Средний диаметр, мм	Скорость потока, м/с
Глина во взвешенном состоянии	-	0,08
Мелкий песок	0,4	0,26
Среднезернистый песок	0,7	0,34
Крупнозернистый песок	1,7	0,39
Мелкий гравий	3,2	0,46
Гравий	27,0	0,97
Галька	54	1,62
Мелкие валуны	171,0	2,27
Средние валуны	409,0	4,87
Крупные валуны	500-800	11,69

Как мы уже знаем, наносы в руслах рек перемещаются качением по поверхности дна, скачками по дну (сальтацией) и во взвешенном (во всей

толще потока) состоянии. А.А. Караушев [48], основываясь на зависимости гидравлической крупности и вертикальной составляющей пульсационной скорости от различных факторов, разделяет речные наносы (в терминологии гидравликов) на 4 категории: 1) наносы, распределенные равномерно в толще потока; 2) наносы, перемещаемые как в толще потока во взвешенном состоянии, так и путем сальтации в придонной области; 3) наносы, транспортируемые в придонном слое путем перекачивания или волочения по дну и сальтации; 4) неподвижные наносы. Несомненно, что такое разделение в определенной мере условно, поскольку в русле постоянно наблюдается переход частиц из одной формы движения в другую. Скачкообразное движение материала представляет собой механизм, с помощью которого турбулентный поток обменивается твердыми частицами со своим дном. Натурные исследования показывают, что качение частиц по поверхности речного дна происходит в один слой и не сплошь, а с более или менее значительными промежутками между движущимися частицами [109]. В реках, русло которых сложено песчаными отложениями, наиболее часто перемещение наносов по дну потока осуществляется в виде грядовой формы движения. В процессе такого движения частицы грунта образуют скопления в форме асимметричных песчаных гряд. С. Шаммом [127] была предпринята попытка создать классификацию русел, основанную на типах переносимого материала и способах его транспортировки в русле (табл. 12).

Таблица 12. Классификация речных русел С. Шамма [127]

Способ транспортировки вещества	Содержание алеврита и глины в русловых отложениях	Доля наносов, переносимых по дну, % от общего количества транспортируемого материала	Типы рек	
			Простое русло (определенного типа)	Сложное русло
Во взвешенном или растворенном состоянии	20	< 3	Русло, по которому переносится материал во взвешенном состоянии. Отношение ширины русла к его глубине < 10; кривизна русла > 2; уклон русла относительно небольшой	Система то сходящихся, то расходящихся протоков
По дну волочением или в виде взвеси	5-20	3-11	Наносы переносятся комплексным способом. Отношение ширины русла к глубине > 10, но < 40; кривизна русла < 2, но > 1,3; уклон русла средний. Русло может разветвляться	Разветвленные дельтовые протоки Протоки аллювиальной равнины
По дну	5	> 11	Русло, в котором наносы переносятся по дну. Отношение ширины к глубине > 40; кривизна < 1,3; уклон относительно крутой. Русло может разветвляться	Протоки аллювиальных конусов выноса

Р.С. Чаловым разработана относительно детальная схема классификации русел равнинных рек по виду русловых деформаций и их морфологическим проявлениям, в которой выделены два основных типа речных русел - широкопойменные (меандрирующие; разветвленные на рукава; с пойменной многорукавностью; неразветвленные, относительно прямолинейные) и врезанные (врезанные излучины; разветвленные; прямолинейные) [131].

Наиболее полно и многообразно формы русла представлены на широкопойменных равнинных реках в условиях свободного развития русловых деформаций (табл. 13).

Таблица 13. Распределение типов русел рек (длиной >500 км) в пределах России и сопредельных стран (в % от общей длины в границах выделяемых областей) [112]

Типы русел	Области с различными условиями развития русловых деформаций					Для всей территории
	Свободные условия	Ограниченные условия	Чередование условий свободного и ограниченного развития			
			в платицидных породах	в скальных породах	при широком распространении унаследованных долин	
Горные	-	9,7	-	0,8	8,1	3,9
Полугорные	4,2	39,6	0,2	17,0	69,4	21,6
Равнинные	95,8	50,7	99,8	82,2	22,5	74,5
Врезанные	3,9	37,9	48,8	36,7	3,8	22,6
прямолинейные	0,7	12,1	16,4	8,1	0,6	6,8
излучины	2,8	20,3	29,7	26,4	1,3	13,2
разветвления	0,4	5,5	2,7	2,2	1,9	2,6
Широкопойменные	91,9	12,8	51,0	45,5	18,7	51,9
прямолинейные	13,6	2,1	6,3	5,9	0,3	7,4
вынужденные и адаптированные излучины	3,5	2,2	7,5	9,7	-	3,6
прорванные излучины	15,6	3,2	3,9	4,7	10,5	9,0
сегментные и петлеобразные излучины	52,4	3,6	27,9	24,3	3,7	27,6
простые сопряженные разветвления	3,9	0,6	2,3	0,3	3,0	2,3
сложные сопряженные и другие виды разветвлений	2,9	1,1	3,1	0,6	1,2	2,0
Длина рек в пределах областей, % от общей длины рек	40,8	33,8	11,0	6,7	7,7	100

В 1965 г. Аллен [155] в своей известной обобщающей статье выделил семь гипотетических геометрических моделей для различных условий формирования аллювиальных отложений, четыре из которых, считающие-

ся самыми важными, приведены на рис. 6. Аллювиальные отложения именно таких типов сохранились в древних толщах [127].

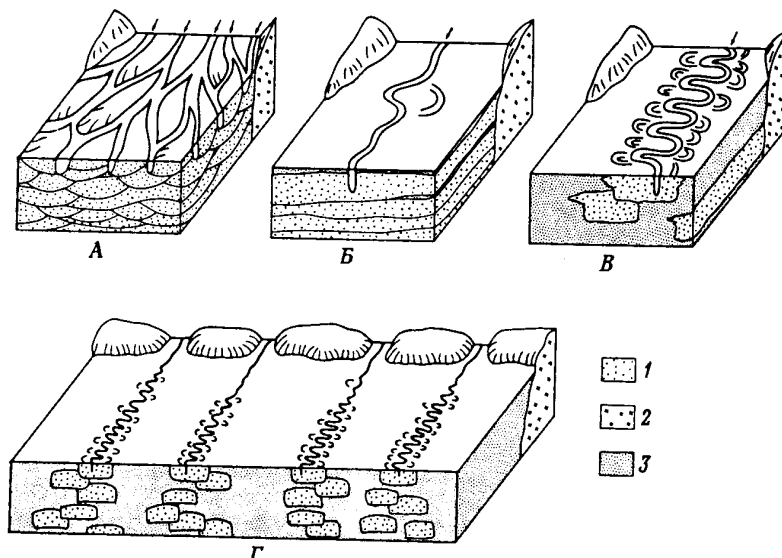


Рис. 6. Модели строения речного русла [127]

A – разветвленный поток; *B* – слабоизвилистый поток; *B* – сильномеандрирующий поток; *Г* – аллювиальная равнина; 1 – грубозернистые осадки конусов выноса, русловых валов и меандр; 2 – коренные породы; 3 – отложения верхней части толщи

Процессы транспорта наносов, по замечанию Р.Б. Пейнера [33], до сих пор остаются наименее изученными из всех гидрологических явлений. Известно, что установившемуся гидравлическому режиму потока обычно соответствует определенное нормальное насыщение и определенный расход перемещаемого материала. Одним из основных показателей эрозивно-аккумулятивной деятельности рек является модуль стока наносов, выражаемый либо в виде величины их твердого стока, отнесенной к единице площади водосборного бассейна (например, в тыс. кг/км² в год), либо в виде мощности (в миллиметрах в год) смываемого с поверхности водосбора слоя (табл. 14, 15). Установлено, что в глобальном плане сток взвешенных наносов и скорость механической денудации заметно больше стока растворенных веществ и скорости химической денудации (табл. 16). Однако на локальных уровнях скорость денудации и транспорт реками различных наносов и веществ зависят от многих факторов и нестабильны год от года (табл. 17).

Таблица 14. Сток наносов в различных ландшафтных поясах и зонах равнин [35]

Пояса	Зоны	Малые реки			Крупные реки			Отноше- ние стока влекомых к стоку взве- шенных
		Пло- щадь бассейна, км ²	Модуль стока во- ды, л/с/км ²	Модуль стока взве- шенных наносов, т/км ² в год	Площадь бассейна, км ²	Мо- дуль стока воды, л/с/км ²	Модуль сто- ка взвешен- ных наносов, т/км ² в год	
Субарктика	Тундра и лесотундра	818	13	5,8 ± 36	40400	12	11 ± 4,7	0,03
Умеренный	Тайга и смешанный лес	1290	8,1	28 ± 7,4	106000	7,1	9,2 ± 2,2	0,20
	Широколиственный лес	1040	7,2	110 ± 18	34800	6,7	67 ± 26	0,06
	Лесостепь	943	3,1	75 ± 20	38200	3,0	35 ± 31	-
	Степь	1420	2,1	79 ± 30	37200	1,5	29 ± 11	0,10
	Полупустыня	1510	1,1	7,6 ± 3,7	18900	0,6	6,3 ± 3,6	0,04
	Смешанные В целом	- 1210	- 5,9	- 66 ± 8,6	480000 127000	5,1 5,1	37 ± 11 22 ± 5,2	- -
Субтропи- ческий	Полупустыня	-	-	-	93200	4,6	130 ± 130	-
	Степь	450	2,8	230	146000	2,0	92 ± 90	-
	Средиземье	829	11	770 ± 250	43500	10	220 ± 78	-
	Лес	830	9,3	350 ± 140	105000	12	80 ± 36	-
	Смешанные	-	-	-	602000	-	74 ± 77	-
	В целом	792	9,4	510 ± 130	210000	9,5	70 ± 30	-
Тропичес- кий и субэк- ватори- альный	Лес	1370	22	300 ± 280	44900	21	380 ± 260	0,50
	Саванна	1030	15	81 ± 28	466000	12	67 ± 30	0,16
	Смешанные	-	-	-	1140000	12	330 ± 290	-
	В целом	1060	16	110 ± 38	518000	15	170 ± 82	0,12
Экватори- альный	Лес	2070	32	72 ± 110	813000	30	46 ± 26	-
	В целом	1160	6,8	99 ± 12	173000	6,7	35 ± 7,0	0,08

Таблица 15. Сток взвешенных наносов рек территории быв. СССР [123]

Бассейн моря, океана	Площадь водосбора, млн. км ²	Сток наносов, млрд. кг в год	Модуль стока наносов	
			тыс. кг/км ² в год	мм в год
Северный Ледовитый океан				
Баренцева и Белого морей	1,25	16,2	13,0	0,009
Карского моря	6,20	36,7	5,91	0,004
Моря Лаптевых	3,67	40,1	10,9	0,007
Восточно-Сибирского моря	1,39	27,1	19,5	0,013
Чукотского моря	0,102	2,44	23,9	0,016
Весь бассейн	12,51	122	9,80	0,006
Тихий океан				
Берингова моря	0,573	7,95	13,9	0,009
Охотского моря	2,80	35,1	12,5	0,008
Японского моря	0,135	1,92	14,2	0,009
Камчатка и Сахалин	0,446	36,8	82,5	0,055
Весь бассейн	3,95	81,8	20,7	0,014
Атлантический океан				
Балтийского моря	0,640	2,30	3,59	0,002
Черного и Азовского морей	1,33	27,8	20,9	0,014
Весь бассейн	1,97	30,1	15,3	0,010
Область внутреннего стока				
Каспийского моря	2,95	98,0	33,2	0,022
Аральского моря и бессточных областей Ср. Азии и Казахстана	2,50	198	79,2	0,053
Вся область	5,45	296	54,3	0,036
Вся территория быв. СССР	23,88	530	22,2	0,015

Таблица 16. Объемы и скорость глобальной эрозии [125]

Континент	Площадь, км ² × 10 ⁶	Сток взвешенных веществ, т × 10 ⁶	Сток растворенных веществ, т × 10 ⁶	Скорость денудации, т/км ²	
				механической	химической
Европа	9,67	420	305	43	32,0
Азия	44,89	7445	1961	166	42,0
Африка	29,81	1395	752	47	25,2
Северная Америка	20,44	1503	809	73	40,0
Южная Америка	17,98	1667	993	93	55,0
Австралия	7,96	257	88	32,1	11,3

Таблица 17. Денудация в небольших водосборных бассейнах Австралии (по Дж. Филду [92])

Показатель	Бассейны, расположенные на					
	граните		разных породах		базальте	
Год наблюдения	1974	1975	1974	1975	1974	1975
Площадь, км ²	7,6		8,8		13,6	
Денудация:						
Общий вынос вещества, т	28,17	91,04	191,65	238,92	141,07	517,52
Компоненты выноса, т						
Растворенное вещество	25,66	73,48	176,64	128,16	135,80	412,37
Вещество в виде суспензии	2,49	17,44	14,97	110,15	5,28	104,97
Перенос по ложу	0,0001	0,001	0,04	0,40	0,02	0,18
Прочие	0,05	0,12	0,008	0,21	0,001	0,008
Компоненты выноса, доля, %						
Растворенное вещество	91,1	80,7	92,2	53,6	96,3	79,7
Вещество в виде суспензии	8,9	19,2	7,8	46,1	3,7	20,0
Перенос по ложу	0,001	0,00002	0,02	0,002	0,002	0,0004
Прочие	0,1	0,002	0,002	0,001	0,001	0,00002
Интенсивность денудации, т/км ²	3,69	4,92	21,78	27,15	10,40	38,17
Понижение поверхности, мм/1000 лет	1,39	4,50	8,22	10,25	3,92	14,40

По Г.В. Лопатину [76], соотношение между взвешенными, влекомыми наносами и веществом, выносимом в растворе речных вод, для рек быв. СССР в среднем составляет 1,45:0,14:1, т.е. преобладает перенос вещества в виде взвеси. Это соотношение отражает общую закономерность и для конкретного водотока может быть другим. По Уоллингу (1971; цит. по [170]), доля взвешенных наносов колеблется в пределах 29,7-53,6%, растворенных веществ - 45,4-76,8%, влекомых наносов - 0,5-2,5% от суммарного стока веществ, переносимых реками. Н.М. Страхов [124] подчеркивал, что несмотря на отсутствие точной математической пропорциональности между величинами механической и химической денудации, с увеличением первой, как правило, усиливается и вторая, и наоборот. При этом химическая и механическая денудации (их интенсивность, величины) зональны, и эта зональность в основе своей климатическая. Так, пояса умеренного влажного климата вне годовых изотерм +10°C отличаются слабой и умеренной механической денудацией, пояс между изотермами +10°C - сильным и очень сильным механическим смывом. Влияние местных (азональных) факторов, особенно техногенных, вызывает существенное нарушение этой общей тенденции, что особенно ярко проявляется в бассейнах малых рек, расположенных в промышленно-урбанизированных и сельскохозяйственных территориях.

Средний модуль водной эрозии для территории быв. СССР, по Г.В.Лопатину [76], составляет 40,3 т/км². Средний годовой модуль стока взвешенных наносов для рек СССР оценивается в 22 т/км² [123]. Н.М. Страховым [125] показано, что темпы механической денудации в бассейнах наиболее крупных рек России редко превышают 70 т/км²

(табл. 18). Естественно, что показатели природного стока наносов для бассейнов меньших размеров могут заметно отличаться от приводимых значений.

Таблица 18. Механическая денудация в пределах речных систем России [125]

Река	Площадь бассейна, 10 ³ км ²	Денудация, т/км ²
Амур	1843	28
Волга	1380	19
Днепр	508	5
Дон	422	18,3
Енисей	2707	4
Индирикка	360	24
Колыма	644	7
Нева	282	3,9
Обь	2425	6
Печора	327	20
Сев. Двина	411	14
Терек	3,7	600
Яна	318	10

К тому же, даже в пределах одного и того же бассейна этот показатель испытывает значительную вариацию. Например, в бассейне р. Пахры (приток р. Москвы) значения природного (естественного) модуля стока взвешенных наносов изменяется от 5 до 30 т/км² [107].

Расходы речных наносов характеризуются большой временной изменчивостью (особенно в засушливых и горных районах), основной причиной которой является режим стока воды, прежде

всего, процесс формирования паводочного стока в пределах речного бассейна и русловой сети, ход развития паводка, степень затопления поймы, относительная высота пика паводка и т. д. [123]. На малых реках (с площадью водосбора $F < 1000$ км²), помимо водности, значение имеют характеристики водосборной территории: увлажненность почво-грунтов, степень их оттаивания к началу половодья, особенности режима стаивания снега и др. На таких реках резко выражен суточный ход мутности и расхода наносов.

Исследования Е.С. Семеновой [123] показали, что суточные волны расходов воды, мутности и расходов взвешенных наносов на малых реках проходят в период половодья, что отражает колебания факторов, определяющих формирование стока воды и процессов водной эрозии в пределах водосборного бассейна. Обычно число суточных максимумов мутности не меньше числа максимумов расходов воды. Наиболее высокие амплитуды суточных волн мутности и расходов взвешенных наносов свойственны малым водотокам ($F < 10$ км²). С увеличением площади водосбора амплитуды суточных волн мутности уменьшаются. На равнинных реках ($F < 1000$ км²) наибольшая мутность может превышать наименьшую за сутки в 20 раз, а в районах с сильно развитой эрозионной деятельностью - в 800 раз. Относительные амплитуды суточных волн мутности и расходов взвешенных наносов всегда значительно превышают амплитуду колебаний расходов воды. При определении сезонных, месячных, суточных значений стока наносов обычно используются хронологические графики расходов наносов, а также графики связи расходов наносов с расходами

воды. Как правило, эти связи имеют петлеобразный характер, обусловленный главным образом изменениями соотношения между расходами воды и наносов в период половодья или паводков [123]. Н.И. Алексеевский [3], основываясь на качественном анализе различных механизмов транспортировки наносов, выделяет несколько масштабов времени, характеризующих изменчивость стокообразования и, соответственно, изменчивость характеристик стока наносов, - внутригодовая изменчивость, многолетняя изменчивость, историческая изменчивость, геологическая изменчивость. При этом процессы транспорта наносов, отвечающие определенным интервалам времени, характеризуются квазипериодической (волновой) природой.

Речные отложения и русловые формы рельефа

Количество переносимого рекой взвешенного материала, характеризующегося показателями мутности, определяется скоростью течения реки, гранулярным составом донных отложений и поступающих в водную массу частиц. Тем не менее известно, что река при одних и тех же гидравлических характеристиках несет разное количество взвеси, т. е. связь между мутностью водного потока и скоростями течения для естественных речных русел является неоднозначной (Россинский, Кузьмин, 1950, цит. по [109]). Аккумуляция наносов в русле реки происходит благодаря пульсации скоростей потока, изменениям его гидравлических характеристик по площади ложа, образованию в потоке циркуляционных течений, транспортирующих осадочный материал на те участки русла, где скорость течения ниже критической [82, 109]. Систематическая аккумуляция наносов начинается тогда, когда количество поступающего в водоток материала оказывается больше транспортирующей способности потока. Осаждение транспортируемых частиц обычно наблюдается в том случае, когда скорость течения становится меньше примерно на 20-25% той скорости, которая была необходима для начала размыва [80].

Характер и особенности накопления отложений в речном русле во многом определяются законом В. Эри, отражающим приближенное соотношение между массой частицы, влекомой потоком, и скоростью течения воды: масса переносимых по дну частиц пропорциональна шестой степени скорости течения. Это в значительной мере определяет известную литологическую (и - отчасти - геохимическую) пестроту аллювия. В то же время, наблюдаемая в реках сортировка отложений по крупности зависит от количества переносимых и осаждающихся наносов, их гранулометрического состава, скоростного режима водотока, длины пути, проходимого взвесью. В большинстве случаев свежесаждаемые отложения подвергаются трансседиментации (переотложению), обусловленной, например,

резким снижением уровня воды, пространственной (в результате впадения притоков и т. д.) и сезонной изменчивостью скоростей течения, сползанием верхнего разжиженного слоя отложений по уклону, взмучиванием и выносом тонких частиц и др.

Движение и последующее осаждение наносов всегда сопровождается организацией их частиц (зерен) в морфологические элементы, поэтому русло любой реки характеризуется одновременным существованием разнообразных форм руслового рельефа (русловых форм, донных форм) [53, 71, 82, 105, 106, 111, 114, 132, 155, 170]. Причины возникновения русловых форм, процессы их развития и переформирования во времени изучены недостаточно полно; отсутствует и единая классификация их, а относительно номенклатуры донных форм среди исследователей имеются большие разногласия. Дело в том, что для каждой реки в отдельности еще можно выстроить иерархию русловых форм, однако составить общеприменимую (единую, универсальную) схему достаточно трудно. Судя по всему, относительно хорошо установлена лишь гидродинамическая значимость более мелких повторяющихся русловых форм (рис. 7). Отметим, что для морфометрической характеристики русловых форм широко используют так называемый индекс донной формы, представляющий собой отношение длины этой формы к ее высоте.

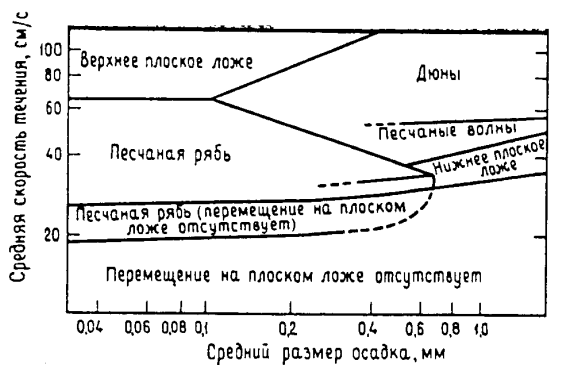


Рис. 7. Расположение полей наиболее распространенных песчаных форм на диаграмме «средняя скорость течения – средний размер зерен» (следует обратить внимание на выклинивание полей песчаной ряби и дюн при критических значениях размеров зерен) [108]

В руслах равнинных рек существуют многочисленные аккумулятивные образования разных размеров, представляющих собой скопление песчаных, иногда галечных отложений на дне русла называемых грядами (в англоязычной литературе *dunes*, т. е. дюны) (рис. 8). Многие из них соизмеримы с шириной русла и достигают в высоту нескольких метров, а в длину - многие километры; другие измеряются первыми сантиметрами и десятками сантиметров [131]. Наиболее распространены малые гряды,

имеющие длину в несколько десятков сантиметров, обычно располагающиеся в шахматном порядке и определяющие степень шероховатости речного дна. Н.А. Ржаницыным [108] установлены эмпирические зависимости высоты и относительных размеров песчаных гряд с порядком водотока (рис. 9).

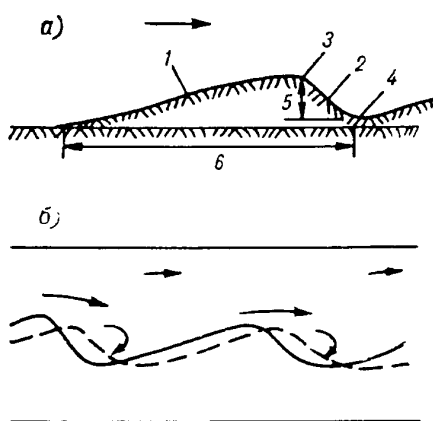


Рис. 8. Основные элементы гряды (а) и схема ее размещения (б) [91]

1 – лобовой (верховой) откос, 2 – низовой (тыловой) откос, 3 – гребень, 4 – подвалье, 5 – высота, 6 – длина гряды

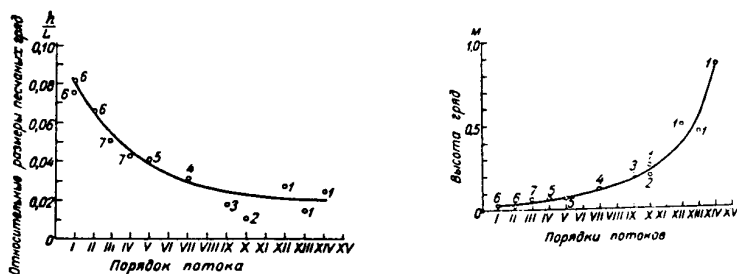


Рис. 9. Высота (а) и относительные размеры (б) песчаных гряд в зависимости от размера реки (порядка водотока) [108]

h – высота гряды, L – длина гряды; реки: 1 – Волга, 2 – Луга, 3 – Керженец, 4 – Истра, 5 – Песочная, 6 – лабораторная модель, 7 – наблюдения на каналах

На равнинных реках формируются так называемые ленточные гряды, размеры которых сопоставимы с размерами речного русла. Гряды располагается либо вдоль течения примерно по оси потока, занимая поч-

ти всю ширину русла (первичные гряды), либо под некоторым углом к оси потока (перекошенные гряды) [91].

Механизм образования русловых гряд на первоначально ровном дне все еще не изучен. Предполагают, что появление первичных неровностей на дне связано с вихревой структурой потока, когда по длине реки зоны повышенных скоростей чередуются с зонами относительного затишья, где и формируются первичные песчаные гряды [91]. В начале движения отдельных песчинок на плоском дне происходит образование небольших поперечных валиков, за которыми сразу же начинается размыв песка. Постепенно валик приобретает характерный профиль волны (см. рис. 8 б). В дальнейшем отдельные зерна с верхового откоса под влиянием возрастающей скорости над ним перемещаются вверх до гребня, а затем сваливаются в подвалье. Встречным движением вихря эти частицы из подвалья вымываются и прижимаются к тыловому скату гряды. Таким образом происходит наращивание последней и перемещение ее вниз по течению. Как уже отмечалось, перемещение гряд рассматривают в качестве важной формы движения речных наносов по дну русла, сложенного песком или галькой. В тонких отложениях грубоалевритовой и меньшей размерности гряды не образуются [71]. Грядовая форма перемещения песчаных наносов является типичной для многих равнинных рек [108]. По оценкам Н.И. Маккавеева [79], количество перемещаемого таким способом осадочного материала в русле Волги и Дона составляет 1-5%, в русле Днепра 15-20% от их общего твердого стока.

В бурном потоке относительно малой глубины (с числом Фруда больше 0,8-1) образуются особые гряды - так называемые антидюны, которые обычно встречаются в виде длинных серий [71]. Они перемещаются вверх по течению путем размыва их низового откоса и намыва верхового, нарастание которого происходит за счет накопления наносов, смытых с низового склона выше расположенной гряды. Таким образом гряда перемещается в противоположном движению частиц направлении, т. е. вверх по течению. Следует отметить, что при чрезвычайно больших скоростях движение донных наносов может осуществляться ровным слоем без образования гряд.

Поскольку считается, что русловой процесс имеет достаточно выраженную дискретную структуру, то это позволяет детализировать его характерные (структурно-морфологические) уровни [53]. Они различаются масштабами действующих факторов и русловых элементов, а также закономерностями руслового процесса, свойственными тому или иному структурному уровню. Каждый класс русловых образований имеет примерно одинаковый объем (площадь), резко отличается по этому признаку от другого класса и определенным образом соотносится со структурными уровнями руслового рельефа, среди которых различают [103]: 1) частицы наносов; 2) ультрамикрoформы; 3) микрoформы; 4) мезоформы; 5) макроформы.

мы, соответствующие формам русла; б) мегаформы. Если первый уровень отвечает отдельным частицам наносов на дне потока, то последний объединяет серии форм всего русла реки; промежуточное положение занимают различные формы грядового рельефа дна русла. В зависимости от расхода воды и наполнения русла (водообильности реки) одни и те же элементы руслового рельефа могут восприниматься по-разному [13]. Так, при очень высоких половодьях даже наиболее крупные гряды из разряда макроформ могут переходить в группу мезоформ.

С самыми низшими структурными уровнями связаны процессы перемещения отдельных зерен наносов в режиме перекачивания и сальтации, вследствие чего формируются ультрамикроформы рельефа. К микроформам обычно относят массовые мелкие образования, не выражающие морфологического строения русла и воспринимаемые как его шероховатость [53]. Очертания микроформ могут быть достаточно разнообразны; образование таких форм связано с пульсациями скорости потока в придонной области, они не оказывают влияния на его структуру. Высота их колеблется в пределах от нескольких мм до 2-3 см, а длина от нескольких сантиметров до 5-40 см, иногда больше. Размеры таких донных форм возрастают с увеличением транспортирующей способности потока, но их величина не зависит от глубины его [71]. В.С. Боровков [13] предлагает к микроформам относить русловые формирования, высота и длина которых соответственно не более 0,1 h (глубины русла) и 0,1 B (ширины русла). Н.И. Маккавеев и Р.С. Чалов [82] микроформами считают миниатюрные гряды, которые называют рифелями, песчаной рябью, рябью течения, представляющие собой самые массовые формы грядового руслового рельефа. Иногда мелкие гряды, длина которых менее 0,6 м, называют знаками ряби, а более крупные - мегарябью. Как правило, знаки ряби асимметричны, крутой склон их обращен в сторону течения, при увеличении скорости которого часто образуется мелкая барханчиковая рябь. Разные типы знаков ряби течения детально рассмотрены Г.Э. Рейнеком и И.Б. Сингхом [106].

Мезоформы руслового рельефа представлены песчаными волнами (или, в терминологии многих авторов, барами), размеры которых малы по сравнению с размерами перекатов. Они возникают обычно на верхних склонах последних и создают своеобразную гофрированность их поверхности [79]. Песчаные волны представляют собой гребневидные текстуры, свойственные поверхности осадочных слоев, по форме напоминающие волны воды и образующиеся быстро движущимися потоками. Это, в частности, наблюдается в так называемых дюнах,двигающихся вниз по течению и в антидюнах, перемещающихся вверх по течению. Последние образуются на речных отмелях. Обычно песчаные волны возникают периодически и могут быть симметричными или неправильными по форме. Термин «песчаная дюна» чаще всего обозначает достаточно

крупные линейные подводные песчаные дюны или бары, образующие положительные аккумулятивные формы. Мезоформы уже активно влияют на шероховатость ложа потока и соответственно на его гидравлические характеристики. Они способны возбуждать в придонной области вихри. В связи с большими размерами мезоформ время переформирования их заметно больше, нежели микроформ.

Макроформам соответствуют рассмотренные выше перекаты, а также гряды, составляющие 0,5-0,1 ширины русла (побочни, косы, осередки и т.п.) [79]. Побочни, как отмечалось выше, представляют собой отмели, примыкающие к берегам. Так называемые ленточные гряды, которые не связаны с берегами, имеют вид осередков, вытянутых по направлению течения и характеризующихся высотой по оси гряды в нижней ее части, считая по течению. Осередками называются отделенные от берегов скопления отложений (наносов) в русле реки в виде невысоких, обычно лишенных растительности, затопленных или частично обнаженных подвижных островов или отмелей, преимущественно продолговатой, вытянутой формы [91]. Закрепление поверхности осередка растительностью при условии продолжающегося намыва может привести к переходу его в остров. Причиной образования осередков может быть скопление наносов у случайных препятствий, а также обсыхание в межень крупных ленточных гряд, формирующихся в русле реки в половодье. По ширине русла обычно располагается несколько гряд-осередков, и оно бывает сильно распластанным. В межень гряды обсыхают и превращаются в осередки, которые затем, закрепляясь растительностью, могут превращаться в острова, а русло становится многорукавным даже в половодье. К макроформам относятся также заструги, возникающие возле берегов, а также косы в устьях островов, вытянутые вниз по течению. Макроформы определяют основной рельеф русел, обуславливают локальные изменения их глубин как вдоль, так и поперек реки. С ними связано возникновение различных вторичных течений в потоке. При низких уровнях воды отдельные части макрогряд могут обсыхать, закрепляться растительностью и превращаться в крупные детали самого русла (острова, выпуклые берега излучин и т. п.).

Уровень мегаформ объединяет серии форм самого русла реки, определяет русловой процесс реки в целом, ее морфологический тип. Характерным примером мегаформ являются речные излучины с прилегающим пойменным массивом, образовавшимся в результате плановых перемещений меандрирующего русла.

Как правило, формы всех классов, т.е. каждого структурного уровня, могут существовать как самостоятельно (обособленно), так и накладываться друг на друга, особенно в средних и крупных реках. Тем не менее, исходя из эмерджентности руслового процесса, каждый структур-

ный уровень развивается по собственному закону, отличному от законов развития других элементов рассматриваемой системы (Знаменская, 1984).

Рассмотренные выше формы руслового рельефа наиболее типичны для рек с песчаным ложем, причем особенно полно все комплексы рельефа выражены в руслах средних и крупных, особенно меандрирующих рек. На реках с галечно-валунным аллювием иерархия грядовых форм рельефа более простая [131]. Здесь обычно возникают в основном только макроформы, на равнинных реках представленные нормальными грядами с пологим верховым и крутым низовым откосами, а на горных реках с бурным течением - антидюнами.

В структуре русла любой равнинной реки выделяют закономерно чередующиеся плесы (более углубленные места, расположенные в петле излучины у вогнутого участка берега) и перекаты, т. е. более мелкие участки, размещенные на относительно прямолинейных участках русла между соседними плесами и пересекающие ось (талweg) реки под острым углом в виде гребня, идущего от выпуклого берега одной излучины к выпуклому участку берега нижележащей по течению излучины (рис. 10-12).

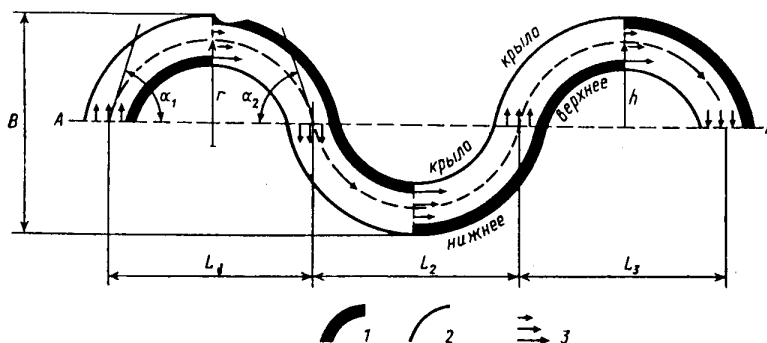


Рис. 10. Элементы излучин русла и распределение в их пределах скоростей, а также зон ускорения (1) и замедления (2) течения [82]

Границы русла: 1 - в зоне ускорения, 2 - в зоне замедления, 3 - векторы скорости. A - ось пояса меандрирования; B - пояс меандрирования; L_1, L_2, L_3 - шаги излучины (их сумма - длина излучины); α_1 - угол входа излучины; α_2 - угол выхода излучины; r - радиус кривизны излучины; h - стрела прогиба

Типичные перекаты представляют собой крупные аллювиальные гряды, пересекающие русло от одного берега до другого [79]. В общем случае различают следующие элементы переката: 1) верхняя коса, расположенная выше (считая по течению) корыта переката, 2) нижняя коса, расположенная ниже корыта (иногда верхнюю косу называют верхним побочнем, нижнюю - нижним побочнем), 3) верхняя плесовая ложина, или лож-

бина, - глубокая часть русла выше переката, 4) нижняя плесовая ложина, или ложбина, - глубокая часть русла ниже переката, 5) седловина, или гребень, - наиболее повышенная часть вала, соединяющего верхнюю и нижнюю косы переката, 6) корыто - наиболее глубокая часть седловины переката, 7) напорный (верхний) скат - верхняя часть седловины переката, обращенная к верхней плесовой ложине, обычно более пологая, чем низовая часть (подвалье), 8) подвалье - низовая часть, или тыловой скат, седловина переката, лежащая ниже вала переката и обращенная в сторону нижней плесовой ложины, часть более крутая, чем напорный скат. Перекаты, у которых напорный скат гребня плавно переходит в тыловой без образования резко выраженного подвалья, называют перевалом.

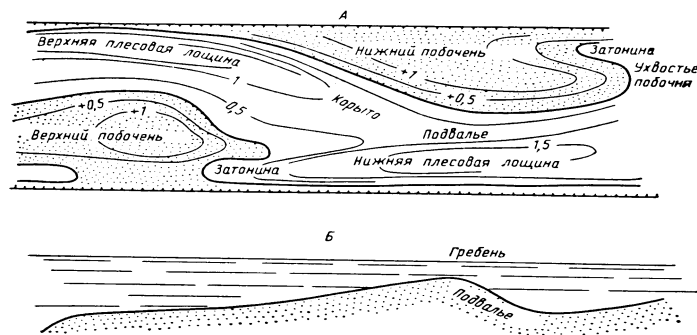


Рис. 11. Основные элементы рельефа переката: А - в плане; Б - в продольном разрезе [82]

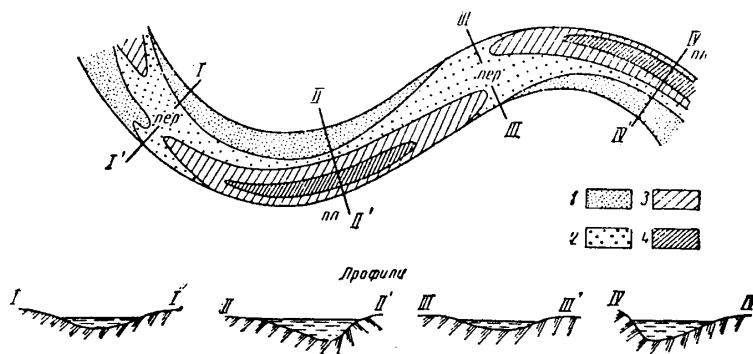


Рис. 12. Схема, показывающая распределение плесов и перекатов в русле меандрирующей реки [142]

пер – перекат; пл – плес; 1 – прирусловые отмели; 2 – тела перекатов; 3, 4 – плесовые ложбины (густота штриховки пропорциональна глубине)

В общем виде закономерности во взаиморасположении плановых очертаний русла и глубин в равнинных реках отражает совокупностью эмпирических положений, сформулированных в следующем виде и получивших название закона Фарга: 1) линия наибольших глубин вдоль по течению реки стремится прижаться к вогнутому берегу; песок и ил с другой стороны откладываются в форме пляжей или широких отмелей на противоположном выпуклом берегу; 2) самая глубокая часть плеса и самая мелкая часть переката сдвинуты по отношению к точкам наибольшей кривизны вниз по течению приблизительно на $\frac{1}{4}$ длины плеса плюс переката; 3) плавному изменению кривизны соответствует плавное изменение глубин; всякое резкое изменение кривизны сопровождается резким изменением глубин; 4) чем кривизна больше, тем больше и глубина плеса; 5) с увеличением длины кривой при данной ее кривизне глубина сначала возрастает, а потом убывает, для каждого участка реки существует некоторое среднее, наиболее благоприятствующее глубинам значение длины кривой.

Генетически перекат представляет собой крупную песчаную одиночную грядку, на меандрирующих реках располагающуюся на перегибах от одной излучины к другой, противоположно направленной, и смещающуюся только в ходе плановых деформаций этой излучины, а на реках с побочным типом процесса обычно сползающую вниз по течению, формирующую в межень побочень. С этих позиций выделение нижних кос или побочней как элементов перекатов имеет преимущественно практическое значение, поскольку перекат формируется одиночной грядкой. При так называемом шахматном расположении побочней на поверхности последних часто наблюдаются две песчаные гряды. Подвалье верхней из них вытянуто примерно параллельно течению и соответствует подвалью верхнего его побочня, подвалье нижней гряды ориентировано косо по отношению к главному течению и соответствует подвалью подводной части нижнего переката и верхнему подвалью нижнего его побочня [131].

На поверхности побочней перекатов обычно образуются гряды более низких порядков. Особенно распространены мелкие песчаные волны, размеры которых несоизмеримо малы по сравнению с размерами перекатов. По Р.С. Чалову, такие микроформы имеются практически в любом речном потоке, причем их образование не находится в непосредственной зависимости от его гидрологического режима и природной обстановки на водосборе, т. е. чем меньше по размерам русловая форма, тем в большей независимости она находится от основных факторов руслоформирования и тем меньше условий необходимо для ее возникновения [131].

Главными факторами, способствующими образованию и сохранению перекатов, являются поступление в речной поток большого количества наносов, превышающего его транспортирующую способность, и отсутствие или слабое развитие поперечных течений. Перекаты играют

существенную роль в регулировании стока наносов. Разнообразие причин и условий образования перекатов способствует тому, что все они в той или иной мере отличаются друг от друга по взаимному расположению составных частей, степени выраженности отдельных элементов их рельефа и т. д. [131]. Это, в частности, и предопределило существование разнообразных классификационных схем перекатов. По мнению Р.С. Чалова, если рассматривать перекаты как грядовые формы рельефа речного русла, то все они, вне зависимости от их генезиса, очертаний и положения на реке, могут быть объединены в несколько морфологических групп. К наиболее распространенным перекатам относятся простые гряды – так называемые нормальные перекаты, состоящие из двух побочней, соединенных между собой седловиной. Если на гряде имеется осередок, разделяющий русло на два больших рукава, то такая гряда называется сложной. Подобные гряды образуются также при наличии в русле крупных островов, к оголовку которых примыкает побочень. В нижнем течении крупных рек (типа Лены, Енисея, Оби) движение донных наносов во время прохождения руслоформирующих расходов осуществляется в виде крупных гряд, ширина которых составляет лишь часть поперечника русла. В данном случае каждый побочень или осередок представляют собой самостоятельную форму руслового рельефа, морфологически не связанную с побочнем, расположенным у противоположного берега. В широких руслах или при малой устойчивости возникают скопления небольших гряд, образующих многочисленные побочни и осередки. Такие перекаты получили название перекатов-россыпей (табл. 19).

Таблица 19. Распространение перекатов разных морфологических типов на средней (Покровск – устье Алдана) и нижней (устье Вилюя – Жиганск) Лене [131]

Тип перекатов	Количество, % от общего	
	средняя Лена	нижняя Лена
Нормальный перекат	44	21
Перекаты, составленные самостоятельными побочнями	40	45
Перекаты-россыпи	16	34

В потоках с очень неупорядоченным полем мгновенных скоростей гряды часто принимают форму дюн, т. е. песчаных гряд массового распространения, перемещающихся по дну речного русла. Для них характерны серповидные очертания в плане, причем в пределах данного участка русла они, как правило, мало отличаются размерами. Дюны располагаются относительно друг друга в общем беспорядочно, лишь слегка напоминая шахматный порядок. Различие между дюнами и побочнями весьма условно и сводится, по существу, к степени симметрии обтекания этих форм потоком. Обычно с побочневой формой перемещения русловых наносов связана извилистость потока, а с дюновой - его разветвлен-

ность [82]. В нативных условиях обе эти формы взаимосвязаны и их выделение часто содержит элементы субъективизма. В зарубежной литературе термин дюна часто применяется к любым формам песчаных гряд.

В общем случае тип руслового процесса, свойственный той или иной реке или ее отрезку, определяется прежде всего характером макроформ, в свою очередь зависящих от всей совокупности характеристик режима жидкого и твердого стока. Наиболее полной схемой типизации руслового процесса является известная классификация ГГИ (рис. 13). Ленточно-грядовый тип, при котором деформации русла сводятся к сползанию по нему в течение всего года одиночных ленточных гряд, занимающих всю ширину русла и вызывающих периодическое повышение и понижение дна. Побочный тип, являющийся следующей стадией развития ленточно-грядового, возникает в том случае, когда ленточная гряда в связи с ухудшением в межень условий транспорта наносов, оказывается перекошенной. Наиболее возвышенная прибрежная ее часть обсыхает, и движение гряды прекращается. На участке между двумя смежными побочными в этот период начинается небольшой подмыв берегов в связи с искривлением оси потока, обтекающего побочни. Этот размыв ликвидируется наполнением побочни в последующие половодья. Так называемое ограниченное меандрирование возникает при дальнейшем уменьшении транспортирующей способности потока, вследствие чего побочни закрепляются и приостанавливают свое движение даже в половодье. Образующийся в межень размыв берегов на участках между смежными побочными ликвидируется в половодье не полностью, и развиваются излучины русла. Если долина реки узкая или ее террасы сложены трудноразмываемыми грунтами, то излучины не получают существенного развития и их деформации сводятся к постепенному сползанию без изменения форм и размеров. Свободное меандрирование возникает при отсутствии факторов, препятствующих перемещению русла в плане. В этом случае развиваются излучины сложных очертаний, которые в начальной стадии сползают, а затем деформируются в плане по схеме разворота излучины вокруг относительно неподвижных точек, расположенных в зоне сопряжения участков русла с различной кривизной. В конечной стадии развития излучина приобретает форму петли с хорошо выраженным перешейком, который может быть прорван потоком, после чего цикл развития излучины повторяется. Незавершенное меандрирование осуществляется в условиях хорошо затопляемых пойм, когда цикл развития излучины нарушается образованием спрямляющего потока. Со временем может формироваться так называемая пойменная многорукавность. Осередковый тип (русловая многорукавность) возникает непосредственно из ленточно-грядового, когда поток сильно перегружен донным наносами. В этом случае образуется распластанное русло, по которому движутся либо расчлененная ленточная гряда, либо ряды этих гряд; возвышенные части

гряд, обсыхая в межень, образуют осередки, которые в условиях длительной межени могут превращаться в острова. При наличии больших уклонов образуются подвижные гряды и блуждающие русла.

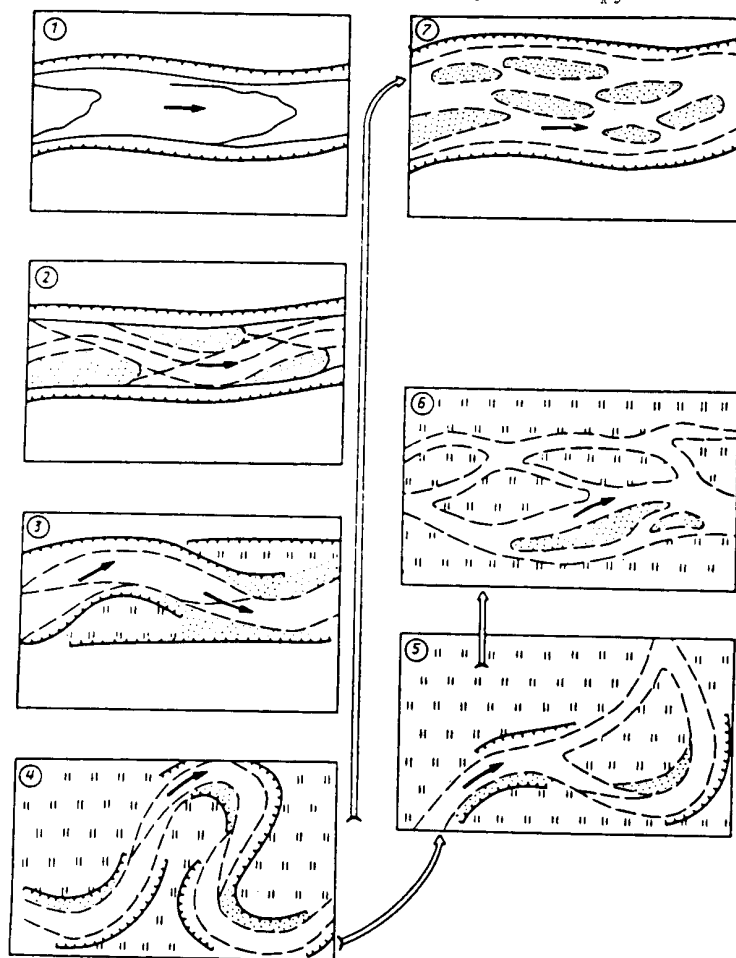


Рис. 13. Схема типизации речных русел по соответствующим им деформациям (по Н.Е. Кондратьеву и И.В. Попову)

1 – ленточно-грядовый тип; 2 – побочный тип; 3 – меандрирование ограниченное; 4 – меандрирование свободное; 5 – меандрирование незавершенное; 6 – пойменная многоруканность; 7 – осередковый тип, или русловая многоруканность.

Следует отметить, что аккумулятивной деятельности малых равнинных рек способствуют особенности русловых процессов, типичные только для этих водотоков. Например, для них характерны небольшие соотношения между шириной и глубиной русла, что приводит к резкой дифференциации глубин вдоль реки при чередовании плесов и перекатов, особенно отчетливо проявляющейся на меандрирующих реках. Вследствие подпорного воздействия перекатов в межень в пределах плесов и плесовых ложин скорости течения снижаются до минимума, а сам поток как бы распадается на систему озеровидных плесов со стоячей водой, что способствует аккумуляции наносов. Формирование подобного русла происходит главным образом во время весеннего половодья, когда скорости выравниваются по длине потока, происходит размыв плесовых ложин и аккумуляция наносов на гребнях перекатов. Если основным источником поступления наносов в реки являются талые воды, то заметно заиления русел не наблюдается, поскольку максимум выноса совпадает с периодом прохождения руслоформирующих расходов и наибольшей транспортирующей способности потока. Если главным фактором эрозии почв является дождевой сток, то максимум формирующей деятельности потоков и максимум поступления в реки наносов находятся как бы в противофазе, что способствует активному накоплению отложений в руслах. Данный процесс интенсифицируется в случае развития в русле и на отменях растительности. Еще более активизируются процессы аккумуляции при развитии ускоренной эрозии, при поступлении сточных вод и поверхностного стока с освоенных территорий, что обуславливает постоянную перегрузку потоков наносами, в большинстве случаев обладающих специфическим физико-химическим составом. В конечном счете все это способствует распространению аккумулятивных процессов на все фазы водного режима и приводит к заилению и деградации русел малых и даже средних рек, вплоть до их полного исчезновения.

Водная биота и ее роль в процессах руслового осадконакопления

Живые организмы (гидробионты) - важнейший компонент водных систем; само понятие «природные воды» уже подразумевает наличие живого вещества как неотъемлемого их компонента. Важнейшими абиотическими факторами речной среды, определяющими условия обитания гидробионтов, являются режим стока, скорость течения, температура, химический и газовый составы воды, их динамика, литологические и геохимические особенности донных отложений [45]. Формирование качества поверхностных вод во многом связывают с процессами так называемо-

го биологического самоочищения. Механизм самоочищения рассматривается как процесс переработки загрязняющих (главным образом, органических) веществ в биомассу гидробионтов в результате их биотического круговорота, осуществляемого через трофические связи населяющих водные объекты организмов. В реках сосуществуют три взаимозависимые группы водных организмов: продуценты (автотрофные организмы, создающие с помощью фотосинтеза или хемосинтеза органические вещества из неорганических), консументы (гетеротрофные организмы, являющиеся в трофической цепи потребителями органического вещества) и редуценты, или деструкторы (организмы, питающиеся мертвым органическим веществом и подвергающие его минерализации). Тесная биологическая связь этих трех групп и делает возможным замкнутый круговорот веществ в биоценозе и биотопе.

Продуценты, к которым относятся растения, образуют органические вещества из неорганических. Эти последние представляют собой пищу для консументов, к которым относятся главным образом животные. Промежуточное звено между продуцентами и консументами составляют редуценты - микроорганизмы, разлагающие органические вещества, происходящие из остатков растений и животных. В бентосе рек наибольшее значение имеют лито-, аргилло-, псаммо- и пелореофильные формы. Литофилы населяют каменистый грунт участков с быстрым течением. К ним относятся многочисленные водоросли и мох *Fontinalis*, а также губки, ресничные черви, олигохеты, пиявки, большое число видов насекомых (особенно личинки многих симулиид, ручейников, поденок, веснянок), моллюски *Dreissena polymorpha* и др. [45]. Аргиллофильные формы, населяющие глинистый грунт на участках русла с быстрым течением, представлены преимущественно роющими личинками поденок и ручейников. Псаммофилы осваивают песчаные участки русла (также с быстрым течением). Чаще всего они представлены мелкими организмами, относящимися к бактериям, водорослям, простейшим, коловраткам, нематодам, олигохетам, насекомым, высшим ракообразным, моллюскам. Бентос песчаных грунтов довольно разнообразен по видовому составу. Пелореофильные организмы, встречающиеся на илистых отложениях, представлены бактериями, диатомовыми и зелеными водорослями, и из животных - простейшими, коловратками, олигохетами, нематодами, личинками хирономид, моллюсками. Последние, как правило, тяготеют к илистым речным отложениям. Возможно, в силу этого бентос заиленных отложений отличается высокой биомассой, но сравнительно небольшим видовым разнообразием. Так называемый гипореос, населяющий более глубокие слои донных отложений, обычно представлен веслоногими и ракушкочными рачками, клещами, тихоходками, личинками насекомых, водорослями - диатомовыми, протококковыми, сине-зелеными. Донные отложения рек - важнейшая среда обитания микроорганизмов [176]. В равнин-

ных реках с продвижением к середине русла биомасса организмов бентоса обычно падает, но их численность часто возрастает. В периоды половодий бентос реки может резко обедняться, прежде всего, из-за вымывания организмов.

Основным элементом биоты рек, связанным с донными отложениями, являются макрофиты, т.е. высшие водные и прибрежно-водные растения, а также прикрепленные низшие и плавающие водоросли. Макрофиты играют важную роль в жизни водоема, выполняя прежде всего роль мощных биофильтров и способствуя закреплению отложений, особенно илистых [9, 45, 49]. Они активно перехватывают взвешенные в воде вещества, поглощают органические и неорганические соединения, служат местом нереста и обитания рыб, других гидробионтов, водоплавающих птиц, пищей для многих из них. Состав, степень развития и особенности пространственного размещения макрофитов в реках в существенной мере определяются скоростью течения, мутностью воды, свойствами донных отложений и их гидродинамической устойчивостью. В большинстве случаев наиболее благоприятные условия для развития высшей водной растительности создаются в руслах со слабым течением, а также в затонах, заводях, старицах. На равнинных реках, особенно в малых и средних, макрофиты способны развиваться и существовать практически в любых гидродинамических условиях, свойственных этим водотокам. Тем не менее о приуроченности видов и групп растений к определенному составу донных отложений известно немного. Обычно илистые отложения, богатые органическим веществом и достаточно устойчивые к размыванию, характеризуются обильным развитием макрофитов. Песчаные и глинистые, в различной степени заиленные отложения также достаточно благоприятны для поселения многих видов макрофитов [49]. На органических илах распространены растения с плавающими листьями. Некоторые макрофиты способны устойчиво существовать даже на крупнозернистых песках и гравийно-галечных отложениях. На развитие прибрежной растительности серьезное влияние оказывают сезонные колебания уровня (уреза) воды, а также характер берегов. Как правило, отмелье и крутые берега существенно различаются составом и строением растительных сообществ.

На равнинных реках в идеале формируется полный поперечный профиль растительных зон: зона прибрежной растительности - зона надводных растений - зона растений с плавающими листьями - зона погруженных растений - зона растений с плавающими листьями - зона надводных растений - зона прибрежной растительности. Такое разделение растений по своеобразным экологическим группам, не претендуя на ранг классификации, с практической точки зрения достаточно удобно (рис. 14). В зоне прибрежных и надводных растений наибольшее развитие получают осоки, камыш, хвощи, тростник, рогоз и др., которые часто

собны образовывать густые заросли. В зоне растений с плавающими листьями встречаются представители семейства нимфейных (кубышка и кувшинка), рдесты и др. Зона погруженных растений характеризуется присутствием некоторых рдестов, урути, роголистника. Группа свободно плавающих растений наибольшее развитие получает на участках с замедленным течением, особенно в затонинах и густых зарослях других макрофитов. Указанная последовательность растительных зон в реках в реальных условиях наблюдается далеко не всегда. Обычно существуют профили растительности, где весь поперечный разрез реки занимают ассоциации, свойственные двум, максимум трем зонам. Очень часто одна зона макрофитов перекрывается другой; зональность водных макрофитов может и вовсе отсутствовать. Иногда более или менее стабильно прослеживаются только зона прибрежных растений и зона погруженных растений.

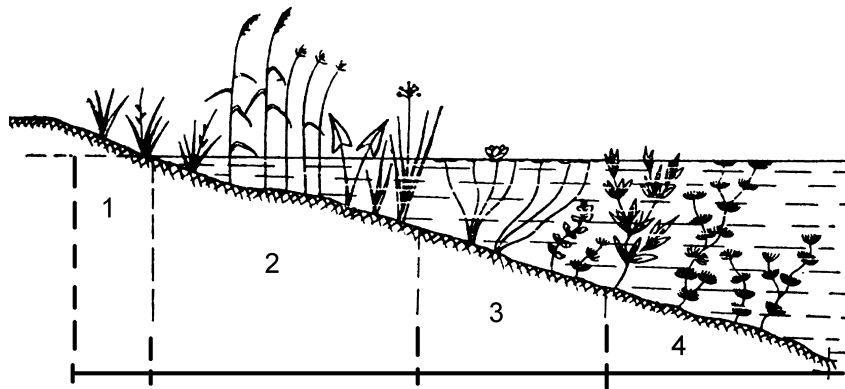


Рис. 14. Схема распределения растительных зон в реке

1 – прибрежные растения; 2 – надводные растения; 3 – растения с плавающими листьями; 4 – погруженные растения

Продолжительность вегетационного периода большинства макрофитов водоемов России составляет примерно 4 месяца. Об особенностях фенологических фаз у водных растений известно мало; этот вопрос еще требует детальной проработки. Обычно в сезонном развитии водных растений различают (как и для всех типов растительности) пять фенологических фаз (с подфазами) [49]: вегетативная, бутонизации, цветения, плодоношения, отмирания. Период относительного зимнего покоя иногда выделяется в качестве шестой фазы.

Макрофиты играют важную роль в изменении гидродинамических параметров потока, способствуя более интенсивной аккумуляции твердого материала. Так, в летне-осенний период на многих реках происходит

изменение гидравлических условий протекания под влиянием появления, развития и отмирания водной растительности. Вследствие появления растительности в русле происходит изменение гидравлических свойств его: увеличивается шероховатости русла, уменьшаются скорости течения. Гидравлическое осаждение взвеси в существенной мере обусловлено

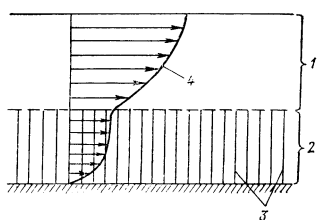


Рис. 15. Схема течения в заросшем русле [13]

1 – течение потока над растительностью, 2 – течение потока в растительном слое, 3 – растительность, 4 – эпюры скоростей

хорошо известным явлением - резким снижением скорости течения в растительном слое по сравнению со скоростью потока над растительностью (рис. 15). Это вызвано тем, что в пределах растительного слоя на водный поток оказывают влияние сопротивление растительности и трение по дну. Активному осаждению взвеси способствует также общее строение водных растений и своеобразная форма и свойства их листьев. Листья и стебли многих макрофитов имеют сильно развитую губчатую ткань, обладающую высокими сорбционными

свойствами. Например, существенную часть объема роголистника составляют воздухоносные полости и большие межлистники, что и позволяет ему находиться во взвешенном состоянии в воде. Все погруженные водные растения за счет длинных стеблей и листьев, часто расчлененных на мелкие нитевидные дольки, занимают значительно больший объем водного пространства, нежели их общая масса. Изменение гидравлических условий зависит от степени развития и отмирания растительности. Поскольку ход развития и отмирания растительности во времени (в соответствии с термическим режимом) плавный, то и гидравлические условия соответственно этому ходу изменяются плавно [133]. Обычно чем более развита растительность, тем больше сопротивление и тем меньше скорость потока. Именно поэтому время добегания воды отличается в начале лета малыми значениями, к разгару лета достигает максимального значения, а к концу осени снова несколько возрастает.

Макрофиты - субстрат для развития перифитона. Перифитон - это специфическая экологическая группировка гидробионтов, жизнедеятельность которых протекает на границе раздела жидкой и твердых фаз и в сообществах которых прикрепленные (в данном случае к макрофитам) формы являются эдифицирующими (средообразующими). В пресноводных водоемах в состав перифитона входят различные водоросли, бактерии, олигохеты, личинки хирономид, нематоды, моллюски, встречаются губки, мшанки, грибы и другие организмы. Специфическим компонентом перифитонных биоценозов являются водоросли, или эпифитон (водорос-

левые обрастания, эпифитные водоросли и т. д.). Особенно детально изучен перифитон озер и водохранилищ, но в последние годы пристальное внимание стало уделяться и речному перифитону, в первую очередь, эпифитону. Эпифитон играет важную роль в формировании качества вод, а также в процессе первичного образования органического вещества, тем более что биомасса обрастаний возобновляется несколько раз за вегетационный период. По различным оценкам, озерный эпифитон может создавать от 4,6 до 70% общей продукции органического вещества в водоеме. Фотосинтез фитопланктона и прикрепленных водорослей играет решающую роль при самоочищении воды, поскольку служит мощным источником ее аэрации.

Макрофиты являются субстратом, на который осаждаются твердые частицы, что приводит к образованию эпифитовзвеси – неотъемлемого компонента любой водной экосистемы [147, 148]. На стеблях и листьях макрофитов в результате осаждения (налипания, адсорбции) взвешенных в воде твердых частиц (речной взвеси) практически всегда наблюдается образование эпифитовзвеси. Закреплению взвеси на стеблях и особенно на листьях макрофитов способствуют различные растительные выделения (экзометаболиты), образование слизистой пленки и т. п. В свою очередь, на слизистые обрастания и хлопьеобразные скопления речной мути оседают личинки и взрослые формы различных беспозвоночных, а также одноклеточные водоросли, существенно увеличивая тем самым сорбционные свойства растительных зарослей. Эпифитовзвесь играет значимую роль в миграции и перераспределении осадочного материала и связанных с ним химических элементов, в трансформации форм нахождения последних, в поставке химических веществ в водные растения и другие организмы; с эпифитовзвесью связан определенный трофический уровень, а химические элементы, содержащиеся в ней, следует рассматривать как составную часть потоков веществ, поступающих в пищевую цепь и участвующих в биогеохимических и седиментационных процессах [150]. После отмирания растений эпифитовзвесь является вторичным источником поставки веществ в водную массу и участвует в формировании химического состава речных отложений.

4. Геохимические условия аллювиальной обстановки осадконакопления

Аллювий образуется на любой стадии развития речной долины, поскольку эрозия и аккумуляция теснейшим образом связаны и в той или иной форме всегда сопутствуют друг другу. В ходе аллювиального седиментогенеза в зависимости от направленности движения земной коры,

рельефа, климата и режима водных потоков обычно меняется лишь динамика процесса аккумуляции и тем самым степень развития и особенности строения аллювиальной толщи. В свою очередь, геология и растительно-почвенный покров водосборов создают общий фон для формирования литолого-минералогических и геохимических характеристик аллювиальных отложений. Большое значение имеют физико-химические параметры среды осадконакопления и процессы, определяющие поведения химических элементов в водной толще и донных отложениях.

4.1. Химический состав речных вод и его формирование

Важнейшими особенностями рек, имеющими первостепенное значение для формирования их геохимического облика, В.И. Вернадский считал: 1) резкое преобладание (по весу) в газовой атмосфере пресных рек CO_2 над N_2 и O_2 ; 2) нахождение органического вещества в растворе и золях, а также «в микроскопической жизни меньше 10^{-4} см размерами, главным образом бактерий»; 3) высокое содержание мути, количество которой (по весу) аналогично другим компонентам природной воды и которая теснейшим образом связана с живым веществом, с геохимической энергией жизни; 4) чрезвычайная изменчивость химического состава растворенного и мелкодисперсного вещества, которое несут реки, причем эти колебания резко проявлены для всякой отдельной реки; 5) существенная роль сорбционных процессов в миграции химических веществ; б) геохимическая индивидуальность реки, точно отражающая сложные химические равновесия ее бассейна, «его почвенные растворы, его грунтовые воды, его метеорные воды, его поверхностные воды, его живое вещество и их изменения в связи с климатическими колебаниями, а в большие периоды времени - с геологическими изменениями» [20].

О.А. Алекин [1] главными особенностями рек, от которых зависят их гидрохимические характеристики, называет: 1) быструю смену воды в речных руслах, в результате чего она взаимодействует с горными породами ограниченное время и испаряется незначительно; 2) формирование состава воды в самых верхних слоях земной коры, как правило, хорошо промытых; 3) сильную зависимость водного режима от гидрометеорологических и климатических условий; 4) хорошее взаимодействие воды с атмосферой; 5) интенсивное воздействие гидробионтов на речную воду. Это, в свою очередь, обуславливает следующие основные черты химического состава речной воды; 1) малую по сравнению с другими водными объектами минерализацию; 2) высокую изменчивость состава вод под влиянием гидрометеорологических факторов; 3) постоянное присутствие в воде атмосферных газов и ничтожно малое количество других газов, отсутствующих в атмосфере.

По мнению Р.Дж. Гиббса [169], химический состав речных вод в естественных условиях контролируется главным образом тремя механизмами: 1) влиянием атмосферных осадков; 2) химическим выщелачиванием горных пород бассейна; 3) процессом испарения - кристаллизации. Другие характеристики бассейна - рельеф и растительность - имеют второстепенное значение. Согласно Гиббсу, можно говорить о трех типах поверхностных вод. В условиях влажного тропического климата поверхностные воды, дренирующие кристаллические породы, в основном являются слабоминерализованными; химический состав их подобен составу морской воды (за исключением Si и K); здесь формируется «атмосферный» тип поверхностных вод. В аридной зоне (сильное испарение воды) происходит селективное осаждение минералов, в результате чего речные воды обогащаются SO_4^{2-} , Na^+ , Cl^- и формируется «эвапоритовый» тип вод, для которых характерна средняя и высокая минерализация. Промежуточное положение занимает «породоуправляющий» тип вод.

Дж. Драйвер [37] важную роль в формировании химизма природных вод отводит типу горных пород, климату (прежде всего, количеству атмосферных осадков), растительности, а также фактору времени (в смысле продолжительности контакта между породой и водой). Последний фактор, по его мнению, является важнейшей переменной, определяющей химию стока, особенно в зонах развития магматических пород, хотя, конечно, время контакта воды с подстилающей поверхностью само по себе зависит от многих других факторов окружающей среды.

В.И. Вернадский показал, что речная вода в основной массе своей есть функция метеорной воды, а в качестве ведущего механизма, определяющего состав воды рек, выступают почвенные растворы, главным агентом в создании которых является жизнь [20]. Так, разложение растительных остатков в почвах поставляет в воды углекислый газ, который, растворяясь, дает анион HCO_3^- ; высокие концентрации Ca определяются его высокими содержаниями в растительных остатках, в свою очередь отличающихся относительно пониженными количествами Mg и Na. Б.Б. Польшов [101] подчеркивал, что состав речных вод обуславливается не столько действием воды на минералы пород, а сколько быстро текущим процессом извлечения химических элементов из минералов организмами и растворением в воде зольной части последних при их разложении. Следует добавить, что для формирования химического состава воды малых рек велико значение верховодки, находящейся в теснейшей связи с атмосферными и почвенными водами. По расчетам С.Л. Шварцев [139], в составе подземного химического стока ведущее значение имеют химические вещества, образующиеся именно при разложении растительных остатков в почве. По образному выражению А.И. Перельмана [98], главной фабрикой формирования химического состава поверхностных и грунтовых вод (особенно гидрокарбонатно-кальциевых) является та среда, где наиболее энергично

идет разложение растительных остатков, т. е. почва. Это, подчеркивает А.И. Перельман, и объясняет тот факт, почему ионный состав вод в ландшафтах влажного климата относительно однообразен и слабо зависит от геологического строения района.

Важной характеристикой речных вод выступает их минерализация (Σ_m), под которой понимают суммарное содержание в ней всех обнаруженных при химическом анализе минеральных веществ (обычно выражаемое в мг/л). О.А. Алекин подчеркивает, что данная количественная характеристика состава воды носит отчасти условный характер, поскольку полнота анализа вод может быть различной, так же как и форма выражения его результатов. Основными ионами, определяющими минерализацию речных вод, являются карбонаты, бикарбонаты, хлориды, сульфаты, натрия и калий, суммарное содержание которых в большинстве случаев достигает 99%. В гидрохимической практике часто используют также показатель «сумма ионов» (Σ_i), отражающий сумму всех ионов, концентрации которых больше 0,1 мг/л [1]. Минерализацию воды оценивают и по так называемому сухому (плотному) остатку, который получают упариванием отфильтрованной пробы воды с углекислым натрием и последующим высушиванием при температуре 150-180°C. Применение углекислого натрия необходимо для предотвращения гидролиза в процессе выпаривания и перевода гигроскопических солей щелочноземельных элементов в негигроскопические карбонаты. Сухой остаток не всегда согласуется с величиной минерализации, рассчитанной суммированием растворенных компонентов.

В биосфере преобладают речные воды с минерализацией менее 500 мг/л, т.е. ультрапресные и пресные, по А.М. Овчинникову, или средней и малой минерализации по О.А. Алекину. Речные воды с высокой минерализацией (> 1000 мг/л) в природных условиях встречаются очень редко. Между минерализацией и ионным составом природных вод наблюдается определенное соответствие. В естественных условиях граничному значению минерализации 1000 мг/л соответствует смена преобладания карбонатных ионов преобладанием сульфатных ионов и преобладания ионов кальция преобладанием ионов натрия, а граничному значению минерализации 10000 мг/л – смена преобладания сульфатных ионов преобладанием ионов хлоридных [15].

Основные компоненты химического состава речных вод разделяют, в определенной мере условно, на пять групп [1]: 1) главные ионы (компоненты солевого состава, макрокомпоненты), содержащиеся в наибольшем количестве (ионы калия K^+ , натрия Na^+ , магния Mg^{2+} , кальция Ca^{2+} , хлоридные Cl^- , сульфатные SO_4^{2-} , гидрокарбонатные HCO_3^- , карбонатные CO_3^{2-}); 2) растворенные газы (кислород O_2 , азот N_2 , диоксид углерода CO_2 , сероводород H_2S и др.); 3) биогенные элементы (соединения азота, фосфора, кремния); 4) микроэлементы (соединения остальных хи-

мических элементов); 5) растворенные органические вещества. Особое положение занимают ионы водорода H^+ , присутствующие в речных водах в незначительных количествах, но играющие значимую роль в химических и биогеохимических процессах и во многом определяющие особенности поведения практически всех химических элементов. Кроме того, речные воды обладают такими качественными характеристиками, как жесткость, щелочность, окисляемость, агрессивность, электропроводность, которые обусловлены не одним, а совокупностью нескольких компонентов их состава. Важным компонентом речных вод являются взвешенные в них твердые вещества, количество которых характеризуется таким показателем, как мутность воды.

В настоящее время имеется несколько десятков классификаций природных вод по химическому составу (О.А. Бозояна, А.А. Бродского, М.Г. Валяшко, О.С. Джикия, В.А. Сулина, С.А. Щукарева и др.). Для речных вод удобной в практическом применении является известная классификация О.А. Алекина, сочетающая принцип деления химического состава по преобладающим анионам и катионам с делением по количественному соотношению между ними. Преобладающими считаются ионы с наибольшим относительным содержанием в процентах в пересчете на количество вещества эквивалентов. По преобладающему (ведущему) аниону воды делятся на три класса: гидрокарбонатные и карбонатные ($HCO_3^- + CO_3^{2-}$), сульфатные (SO_4^{2-}), хлоридные воды (Cl^-). Каждый класс по ведущему катиону подразделяется на три группы: кальция, магния и натрия. В свою очередь каждая группа делится, как правило, на четыре типа вод, определяемых соотношением между содержанием ионов в процентах в пересчете на количество вещества эквивалентов (рис. 16).

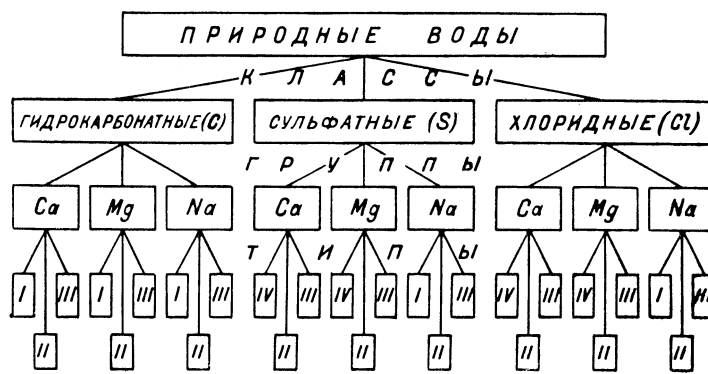


Рис. 16. Схема классификации природных вод О.А. Алекина [1]

Для краткого обозначения выделенных в данной классификации 27 типов природных вод применяются специальные символы. Класс обозначается символом, выведенным из названия соответствующего аниона (С, S, Cl), а группа - особым символом, который проставляется в виде степени к символу класса. Принадлежность к типу обозначается добавлением римской цифры в индексе к символу класса. Таким образом, символы, характеризующие химический состав вод, изображаются так: S_{II}^{Ca} (т. е. гидрокарбонатный класс, группа кальция, тип II). В некоторых случаях в индекс (в названии) следует вводить второй по величине анион или катион, если его содержание лишь немного (в пределах 5%-экв) уступает преобладающему иону (например, S_{II}^{Ca} , т. е. сульфатно-хлоридно-кальциевый тип воды).

Классификация О.А. Алекина не учитывает (крайне маловероятную в естественных условиях) возможность существования речных вод других классов (нитратных, боратных). Кроме того, в некоторых водах не исключена определяющая роль кремниевой кислоты, которая, однако, почти полностью недиссоциирована и не уравнивает катионы. Существует точка зрения, во многом справедливая, согласно которой ионный состав воды не может претендовать на роль главного (универсального) геохимического параметра всех вод. Так, по мнению А.И. Перельмана [98], для широко распространенных ультрапресных вод, богатых растворенным органическим веществом, роль ионного состава несущественна, а завышение в данном случае таксономического ранга ионного состава приводит к ошибке – объединению в одну группу вод с резко различными свойствами. В частности, воды горных рек Памира и коричневые воды рек мерзлотной тайги Сибири относятся по ионному составу к одному гидрокарбонатному кальциевому классу, тогда как, подчеркивает А.И. Перельман, это глубоко различные по своим геохимическим особенностям воды. Тем не менее ряд исследователей полагает, что выделение в отдельный класс природных вод с преобладанием органического вещества невозможно, поскольку оно (вещество) обладает весьма сложным составом. Судя по всему, для речных вод вполне приемлема классификация О.А. Алекина, но, например, с дополнительной характеристикой, отражающей количество растворенных органических веществ.

Самыми распространенными речными водами являются воды гидрокарбонатного класса. Например, площадь, занимаемая бассейнами рек с гидрокарбонатной водой, составляет около 83% территории быв. СССР [1]. По составу эти воды относятся исключительно к группе кальция; гидрокарбонатные воды с преобладанием Na и Mg - крайне редкое явление в природе. По данным М. Мейбека [175], основанных на материалах по химическому составу 64 крупнейших рек мира, 99% речных вод относятся к гидрокарбонатному классу, причем резко преобладают воды группы кальция; натрий как доминирующий катион встречается только в 1,5% случаев (табл. 20). В этом классе вод наиболее распространены реч-

ные воды малой минерализации, которые, например, характерны для большей части Севера Русской равнины и азиатской территории России. Значительно реже встречаются воды средней минерализации (зона лесов и лесостепи средней полосы Русской равнины). Еще меньшую площадь охватывают бассейны рек с водами повышенной минерализации, распространенные в основном в южных районах Восточно-Европейской платформы (лесостепь и степь). Очень редко встречаются гидрокарбонатные воды с минерализацией более 1000 мг/л, что связано с особенностями растворения и существования в растворе гидрокарбонатов Ca и Mg.

Таблица 20. Средний состав природных вод, мг/л

Компоненты	Реки мира				Реки СССР [1]	Зона гипергенеза [139]
	[173]	[2]	[175]	[162]		
HCO ₃ ⁻	58,4	39,89	52	35,15	65,4	187
SO ₄ ²⁻	11,2	11,4	8,25	12,14	17,85	70,7
Cl ⁻	7,8	5,5	5,75	5,68	10,35	59,7
Ca ²⁺	15,0	12,26	13,4	20,39	19,93	39,2
Mg ²⁺	4,1	2,89	3,35	3,41	4,65	18,2
Na ⁺	6,3	4,91*	5,15	5,79	9,26*	67,6
K ⁺	2,3	-	1,3	2,12	-	5,15
SiO ₂	13,1	-	10,4	11,67	-	17,9
Σ _м	119,9	76,85	89,2	-	127,2	469

* K⁺ + Na⁺; ** в скобках приведены концентрации с учетом антропогенной составляющей.

Реки с сульфатным классом воды распространены преимущественно в степной полосе и частично в полупустынях. Здесь ландшафты бедны живым веществом, а в формировании ионного состава вод важную роль играют растворение солей почв и горных пород и процессы испарения. В составе катионов речных вод преобладает Ca (реже Na). Как правило, по величине минерализации сульфатные речные воды заметно превосходят гидрокарбонатные. Для них наиболее характерна повышенная, иногда даже высокая минерализация. По М. Мейбеку [175], на сульфатный класс вод приходится 0,9% всех речных вод мира. Реки с водой хлоридного класса, таким образом, очень редкие. Они протекают преимущественно в степных районах и полупустынях. Преобладающими катионами в данном классе вод, отличающихся высокой минерализацией, являются в основном ионы натрия.

Химический (ионный) состав воды рек подчиняется определенной географической (климатической) зональности [1], которая может нарушаться различиями состава горных пород и условий их залегания, в крупных реках, протекающих через разные климатические зоны, а также в районах интенсивного техногенного загрязнения. Кроме того, в паводья и паводки минерализация и общий состав воды той или иной реки могут существенно изменяться, тем не менее приобретая зональные па-

раметры в меженные периоды и выдерживая их в течение длительного (исторического) времени. Обычно в периоды паводков, когда основную роль в питании рек играет поверхностный сток, минерализация речных вод уменьшается. В летнюю и особенно зимнюю межени преобладает питание рек грунтовыми и подземными водами, вследствие чего минерализация речных вод возрастает.

Реки выполняют огромную работу по транспорту растворенных и взвешенных химических веществ. Обычно в составе растворенного стока выделяют ионный сток, сток органических веществ, сток биогенных элементов, сток микроэлементов, отражающих интенсивность химической денудации. Основную массу переносимых реками растворенных веществ составляет ионный сток. Кроме абсолютной величины стока (в тоннах за сутки, месяц и т. д.), используется относительная величина - показатель ионного стока (в тоннах с 1 км² площади водосбора в год). Его значения зависят от ионного стока, площади водосбора, модуля водного стока, минерализации речной воды. При модуле водного стока (М) в л/сек/км² и минерализации воды (С) в мг/л показатель ионного стока выражается так: $P_i = 0,0315 \cdot M \cdot C$, значения которого для различных речных бассейнов существенно меняются [1]. Зависимость между ионным и водным стоком для многих рек отсутствует. По Н.М. Страхову [125], соотношение между растворенной и взвешенной формами химических элементов в суммарном речном стоке отражает их относительную подвижность в современных условиях.

4.2. Основные процессы, определяющие поведение химических элементов в речных водах

Речные воды представляют собой дисперсную систему, в которой вода является дисперсной средой, а взвешенные в ней частицы - дисперсной фазой. Дисперсные системы по величине частиц дисперсной фазы и по степени дисперсности принято разделять на три группы, между которыми нет резких границ, а существует непрерывный переход: грубодисперсные, коллоидно-дисперсные, молекулярно(ионно)-дисперсные (табл. 21). Соответственно, в гидрохимии различают физические формы миграции химических элементов, адекватные агрегатному состоянию, т. е. элементы могут находиться в речных водах в грубодисперсном состоянии (в составе взвесей, т. е. во взвешенной форме), в коллоидно-дисперсном состоянии (в составе коллоидов, т. е. в коллоидной форме), в молекулярно(ионно)дисперсном состоянии (в истинно-растворенной форме, или в растворенной форме). Количественное соотношение этих форм в каждом конкретном случае может быть разнообразным, что определяется как свойствами элементов, так и факторами среды миграции.

Таблица 21. Классификация дисперсных систем [12]

Группы	Степень дисперсности, см ⁻¹	Диаметр частиц, см	Характеристика частиц
I. Грубо-дисперсные	10 ⁵	> 10 ⁻⁵	Не проходят через тонкие фильтры; сравнительно быстро оседают (или всплывают); не диализируют и не диффундируют; видимы в обычный микроскоп; гетерогенные, неустойчивые, со временем стареют; рассеивают свет в результате отражения и преломления.
II. Коллоидно-дисперсные	10 ⁵ – 10 ⁷	10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁷	Проходят через тонкие фильтры, но задерживаются в ультрафильтрах; заметно не оседают; не диализируют и очень слабо диффундируют; невидимы в обычный микроскоп, но обнаруживаются при помощи ультрамикроскопа; гетерогенные, относительно устойчивые, со временем стареют; дают конус Тиндаля.
III. Молекулярно (ионно)-дисперсные	10 ⁷	< 10 ⁻⁷	Проходят через все фильтры; не оседают; хорошо диализируют и диффундируют; не обнаруживаются и в ультрамикроскопе; гомогенные, оптические посты, устойчивы, не стареют.

Л.Н. Линник и Б.И. Набиванец [75] предлагают такую условную схему разделения физических форм миграции элементов в пресных поверхностных водах: к группе истинно растворенных форм относятся соединения, имеющие номинальные размеры 0,015-0,005 мкм и меньше; к группе коллоидных форм - частицы с размерами от 0,0015-0,005 мкм до 0,3-0,5 мкм, к группе взвешенных форм - частицы с размером больше 0,3-0,5 мкм. Таким образом, в соответствии с предлагаемой схемой, по своим количественным характеристикам истинно растворенные формы несколько перекрываются с коллоидными, а последние с взвешенными, что, видимо, вполне допустимо, поскольку, по справедливому замечанию авторов цитируемой работы, строгое выделение четких количественных границ агрегатных состояний элементов практически недостижимо. Это, в частности, связано с тем, что коллоидные свойства диспергированных в водной среде частиц определяются не только их размерами, но также структурой и химическими свойствами, влияющими на их гидрофильность. Геохимическая роль взвешенных и коллоидных веществ, или «мути», по выражению В.И. Вернадского, очень велика, поскольку «входит в химические взаимодействия, меняет режим газов, ярко, иногда решающе, отражается на биохимических процессах» [20].

В водных экосистемах важную экологическую роль играют микроэлементы, т. е. химические элементы, содержания которых в речных водах не превышают 1 мг/л (табл. 22). Иногда к микроэлементам относят те элементы, которые не определяют химический тип воды. Многие из микроэлементов являются опасными поллютантами.

Таблица 22. Химические элементы в природных водах (раствор), мкг/л

Элемент	Пресные воды рек мира [161]	Речные воды [173]	Пресные воды [166]	Речные воды [31]	Пресные речные, озерные и подземные воды [178]	Реки Московской области
Li	2	3	1	2,5	4,6	2
Be	0,3	-	0,01	-	0,2	0,13
B	15	10	10	18	260	20
F	100	100	-	100	436	200
Al	300	400	<30	160	480	50
Sc	0,01	0,004	-	0,001	0,054	-
Ti	5	3	<1	3	13	6,9
V	0,5	0,9	0,9	1	2	1,14
Cr	1	1	0,5	1	2,6	3
Mn	8	7	<5	10	45	25
Fe	500	670	<30	410	391	270
Co	0,2	0,2	0,05	0,3	2,0	0,3
Ni	0,5	0,3	0,3	2,5	5,5	2,6
Cu	3	7	1,8	7	11,4	7,62
Zn	15	20	10	20	73,6	28,5
Ga	0,09	0,09	-	0,1	0,6	1
Ge	-	-	-	0,07	0,11	0,2
As	9,5	2	2	1,4	1	1
Se	0,2	0,2	0,1	0,2	0,87	0,13
Rb	1	1	-	2	3,0	-
Sr	70	50	50	50	211	-
Y	-	0,7	-	0,7	3,51	0,8
Zr	0,8	-	-	2,6	1,34	0,8
Nb	-	-	-	0,01	<0,3	0,3
Mo	0,5	1	1	1	1,3	0,5
Ag	0,3	0,3	0,3	0,2	0,34	0,26
Cd	0,1	-	0,07	0,2	<0,1	0,24
In	-	-	-	-	<0,1	-
Sn	0,009	-	0,03	0,04	1,45	0,5
Sb	0,2	1	0,1	1	<0,94	1,2
J	-	-	-	2	-	-
Cs	0,02	0,02	-	0,03	1,9	-
Ba	10	10	10	20	34,9	24,1
La	0,1	0,2	-	0,2	0,11	-
Ce	0,2	-	-	0,06*	1,4	-
Pr	-	-	-	0,03*	-	-
Nd	-	-	-	0,2*	-	-
Sm	-	-	-	0,03*	-	-
Eu	-	-	-	0,007*	-	-
Gd	-	-	-	0,04*	-	-
Tb	-	-	-	0,008*	-	-
Dy	-	-	-	0,05*	-	-
Ho	-	-	-	0,01*	-	-
Er	-	-	-	0,05*	-	-
Tm	-	-	-	0,006*	-	-
Yb	0,01	-	-	0,05	0,01	-
Lu	-	-	-	0,008*	-	-
Hf	0,01	-	-	-	-	-
Ta	<0,002	-	-	-	-	-
W	0,03	0,03	-	0,03	0,052	0,1
Au	-	-	-	0,002	-	-
Hg	0,1	0,07	0,01	0,08	0,51	0,066
Tl	0,003	-	-	1	-	0,08
Pb	3	3	0,2	1	6	2,2
Bi	-	-	-	-	<0,01	0,1
U	0,4	0,04	-	0,5	3	-

* К.К. Турекьян (1969).

О.А. Алекин [1] разделяет микроэлементы природных вод на пять подгрупп: 1) типичные катионы (Li, Rb, Cs, Be, Sr, Ba и др.); 2) тяжелые металлы (Hg, Cu, Ag, Pb, Ni, Zn и др.); 3) амфотерные комплексообразователи (Cr, Mo, V, Mn); 4) типичные анионы (Br, J, F, B, As и др.); 5) радиоактивные элементы.

К настоящему времени разработаны различные технологические схемы исследования форм миграции химических элементов (в первую очередь, металлов) в природных водах. В свое время известностью пользовалась схема, предложенная Т.М. Флоренсом [164, 165], основанная на разделении (фильтр с диаметром пор 0,45 мкм) двух основных групп форм металлов - взвешенных и растворенных. В свою очередь, последние разделяются на лабильные и нелабильные (связанные) формы, а в составе этих форм выделяются несколько классов и видов «конкретных» форм миграции. И.С. Сироткиной, Г.М. Варшал и др. [117, 118] обоснована схема определения форм миграции металлов в растворе природных вод, основанная на фракционировании растворенных органических веществ на кислотные, основные и нейтральные группы с помощью целлюлозных ионитов и последующем определении молекулярных масс с использованием сефадексов.

На основе экспериментальных данных и обобщения литературных материалов П.Н. Линником и Б.И. Набиванцем [73, 75] составлена схема исследования состояния ионов металлов в природных водах, которая предусматривает последовательное использование различных методов, позволяющих количественно определить долю отдельных форм элемента по следующим характеристикам: 1) распределение металла между взвешенными, коллоидными и истинно растворенными формами; 2) концентрации свободных (гидратированных) и закомплексованных ионов металлов; 3) знак заряда ионов металлов (концентрация катионных, анионных и электронейтральных форм); 4) молекулярная масса комплексных или полиядерных соединений; 5) прочность связывания металла в комплексные соединения; 6) комплексообразующая способность природных вод по отношению к данному металлу и кинетика комплексообразования; 7) степень окисления металла. По мнению авторов цитируемой работы, указанные характеристики состояния ионов металлов наиболее тесно связаны с их гидрохимическими и гидробиологическими особенностями; часть из них положены в основу классификации примесей в сточных водах, предложенной Л.А. Кульским [63], т. е. их знание необходимо для разработки научно обоснованных технологических схем очистки вод от соединений металлов. Тем не менее, вследствие сложности состава природных вод и разнообразия состояния элементов, унифицированного метода, позволяющего идентифицировать во всех случаях все множество форм миграции химических элементов, все еще не предложено, что, как заметили Б.И. Набиванец и соавт. [89], в настоящее время практически не достижимо. Поэтому в практике эколого-геохимических исследований

обычно применяют разделение форм миграции элементов на две условные группы - взвешенные формы и растворенные формы (табл. 23), что в большинстве случаев достигается фильтрованием воды через мембранные фильтры с диаметром пор 0,3-0,5 мкм (чаще всего используются фильтры с диаметром отверстий 0,45 мкм).

Таблица 23. Химические элементы в речных водах [128]

Элемент	Взвесь		Раствор, мкг/л	Общее, мкг/л	Доля взвешенной формы от вала, %
	мг/кг	мкг/л*			
Li	50	20,5	2,5	23	91,2
Al	83000	42300	160	42460	99,6
Sc	20	10,2	0,004	10,2	99,96
Ti	4000	2040	3	2040	99,86
V	126	64	1	65	98,5
Cr	130	66	1	67	98,5
Mn	1100	560	10	570	98,3
Fe	51000	25500	410	25910	98,5
Co	18	9,2	0,3	9,5	96,6
Ni	84	43	2,5	45,5	94,5
Cu	80	41	7	48	85,5
Zn	31	158	20	178	88,9
Ga	18	9,2	0,1	9,3	98,8
Rb	122	62	2	64	96,9
Sr	270	138	50	188	73,7
Y	27	14	0,7	14,7	95,3
Zr	200	102	2,6	105	97,7
Nb	30	15	0,01	15	99,93
Mo	5,8	3,0	1,0	4,0	75,4
Ag	0,13	0,66	0,2	0,86	77,4
Cd	0,7	0,36	0,20	0,56	64,7
Sb	2	1	1	2	50
Cs	5,2	2,7	0,03	2,73	99
Ba	380	194	20	214	91
La	39	20	0,2	20,2	99
Pb	147	75	1	76	98,8
Yb	2,8	1,4	0,05	1,45	96,6
Th	7,1	3,6	0,1	3,7	97,5
U	1,2	0,61	0,5	1,1	55,7

* Рассчитано при средней мутности рек 510 мг/л.

Количество элементов во взвешенной форме прямо зависит от их концентраций во взвеси и мутности воды (рис. 17). Содержания элементов в растворе речных вод зависят от объема воды, характера химического и биохимического взаимодействия в системе вода/биота/донные отложения. Общая концентрация растворенных форм складывается из суммы неорганических и органических компонент [36]. Растворенные неорганические соединения могут быть представлены свободными ионами, ионными парами, ассоциатами и более сложными комплексными соедине-

ниями. Органическая компонента связана преимущественно с гидрофобными липидоподобными комплексами и с гидрофильными высокомолекулярными соединениями полярной фракции. В свою очередь, в каждом из указанных агрегатных состояний элементы находятся в виде разнообразных физико-химических и химических форм нахождения, что обусловлено сложным минеральным и органическим компонентным составом речной воды, взвешенного и коллоидного вещества (табл. 24, 25, рис. 18).

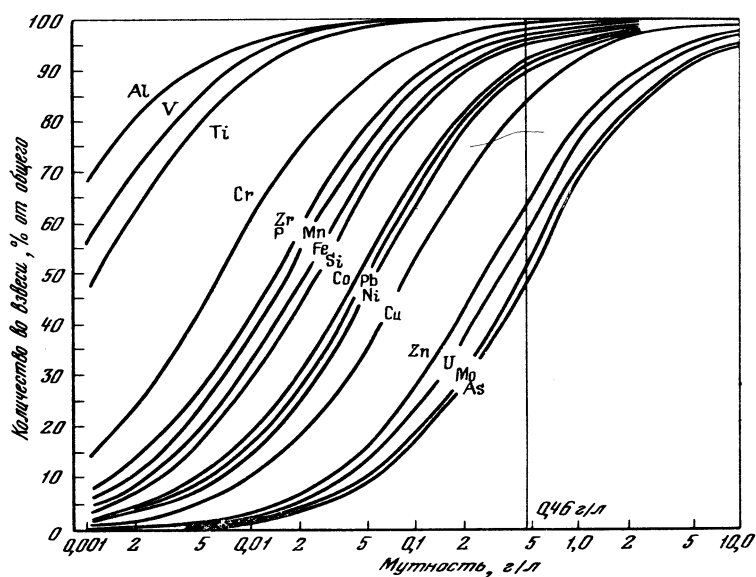


Рис. 17. Содержание взвешенной формы элементов (в % от вала) в зависимости от мутности вод для мирового речного стока [23].

Как правило, подвижность химического элемента определяется не только соотношением его растворенных и взвешенных форм. В растворе вод важную роль играет связывание элементов с органическими комплексообразователями. Для взвеси значение имеет характер распределения химических элементов в различных гранулометрических фракциях взвеси, причем в природных условиях обычно наблюдается закономерное увеличение их концентраций от грубых к более тонким частицам (рис. 19), а также минералого-геохимические формы нахождения элементов (в природных условиях, как правило, преобладают абиогенные соединения химических элементов).

Таблица 24. Формы нахождения Fe, Mn, Zn и Cu во взвеси равнинных рек бассейнов Черного, Азовского и Каспийского морей, % от суммы форм [36]

Элемент	1	2	3	4	Вал, мг/кг
Железо	0,5	11,7	32,0	55,2	33000
Марганец	2,2	84,1	5,8	7,9	1700
Цинк	1,2	45	44,2	9,6	541
Медь	14,4	60,8	19,8	3,1	164

Примечание. Формы: 1 – органическая, 2 – аморфные гидроксиды Fe, Mn и адсорбированные на них и на глинистых частицах металлы, 3 – раскристаллизованные гидроксиды Fe и Mn и адсорбированные на них металлы, 4 – остаточная форма металла в решетке минералов.

Таблица 25. Растворенные формы Fe, Mn, Zn и Cu в воде устьевых участков равнинных рек Черного, Азовского и Каспийского бассейнов, % от суммы форм [36]

Элемент	1	2	3	Вал, мкг/л
Железо	30	40	30	38
Марганец	23,2	52,2	24,6	3,54
Цинк	12,4	60	27,6	32,2
Медь	28,5	55	16,5	9,5

Примечание. Формы: 1 – органическая, гидрофобные липидоподобные комплексы, 2 – неорганическая, 3 – органическая, гидрофильные высокомолекулярные соединения полярной фракции.

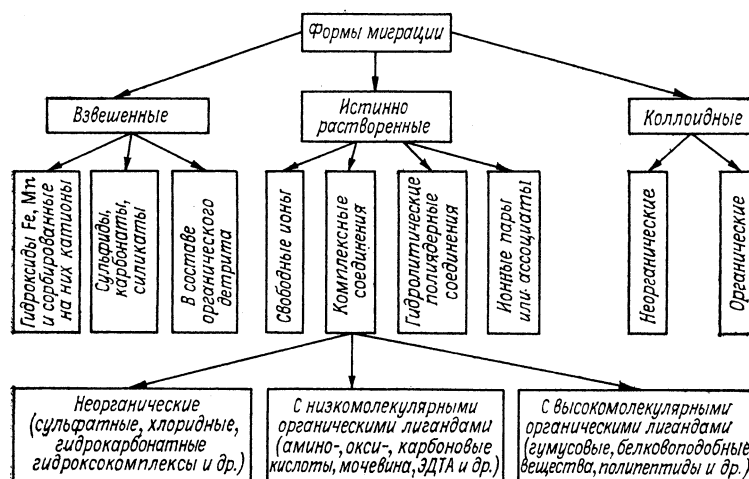


Рис. 18. Формы миграции элементов в речных водах [75].

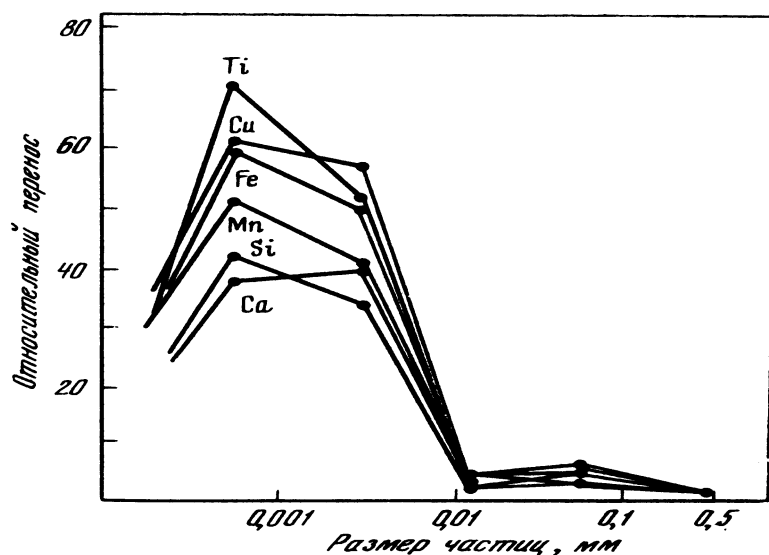


Рис. 19. Относительный перенос отличающихся по характеру распределения в гранулометрическом спектре элементов разными фракциями взвеси рек каспийского бассейна [30]

Поведение химических элементов в реках определяется сложным взаимодействием разнонаправленных процессов, которые способствуют относительно долговременной миграции элементов в водной толще, перераспределению их между различными компонентами речной среды и временному выводу из миграционного потока, а также обуславливают поступление химических элементов в миграционный поток, прежде всего, из донных отложений и водной биоты. Среди физических процессов ведущая роль принадлежит гидродинамическому фактору и гидравлическим характеристикам транспортируемых рекой наносов. Важнейшими физико-химическими и химическими процессами являются растворение, гидратация и выщелачивание. Особую роль играют гидробиологические (биохимические) процессы, определяющие изменение концентраций химических веществ, особенно органических соединений, за счет жизнедеятельности микроорганизмов и других гидробионтов.

Значимость гидродинамического фактора в существенной мере определяется гидравлическими и морфометрическими характеристиками водного потока (и их изменениями по длине реки). Это, прежде всего, ширина и глубина русла, площадь его живого сечения, смоченный периметр, гидравлический радиус, уклон свободной поверхности, скорость

течения, расход воды, ее мутностью, физические характеристики взвеси, прежде всего, гидравлическая крупность, или гидравлический размер частиц. Поскольку в речном потоке всегда существует градиент концентрации некоторых химических веществ, то в таких условиях (наряду с конвекцией, т. е. переносом вещества при физическом перемещении среды, его содержащей) получает развитие так называемая турбулентная диффузия, когда процесс смешения, связанный с турбулентным течением, вызывает перенос растворенного вещества из области высокой в область его низкой концентрации. Турбулентная диффузия является основным динамическим процессом распределения примесей внутри водной массы.

Водный поток обладает целым рядом особых физических свойств, оказывающих влияние на транспорт осадочного материала и соответственно на миграцию химических элементов. Среди таких свойств - кавитационный и флотационный эффекты. Кавитация развивается на участках значительного и резкого увеличения скорости течения и стимулирует размыв отложений, слагающих русло и берега. Флотация, т. е. перенос частиц твердого материала пленкой поверхностного натяжения, довольно часто наблюдается на различных по своим характеристикам реках. Этот эффект проявляется в случае быстрого поднятия уровня воды (вызванного, например, дождями), что приводит к затоплению осушенных приуроченных отмелей. Рыхлый поверхностный материал, слагающий их, в данном случае не смачивается водой и плавает по ее поверхности.

Процесс гидратации заключается во вхождении молекул воды в структуру минералов в виде координационно связанных молекул или не связанных с решеткой молекул. Растворение представляет собой процесс перехода вещества из твердой фазы в жидкую, сопровождаемый разрушением его кристаллической структуры. Этим оно отличается от процессов выщелачивания, т. е. избирательного извлечения какого-либо компонента из твердого тела, сохраняющего при этом свою кристаллическую структуру. Как правило, при взаимодействии твердого вещества с водой наблюдаются два одновременно протекающих процесса: переход ионов из твердой фазы в раствор и обратно. В зависимости от преобладания того или иного процесса происходит растворение или кристаллизация (выделение твердой фазы). Когда скорости обоих процессов выравниваются, наступает равновесие и растворение практически прекращается [44]. Растворимость веществ в природных водах зависит от многих параметров, среди которых рН, Eh, температура, характер электролита (ионная сила раствора), время (продолжительность контакта), размер частиц, химический состав воды и др. Обычно растворение вещества сопровождается его гидролизом, когда ионы гидроксидов и особенно водорода активно взаимодействуют с поверхностными зонами минеральных частиц.

В результате разнообразных физических, физико-химических, химических и биохимических процессов химические элементы и их соединения, транспортируемые речным потоком, способны выводиться (хотя бы временно) из водной толщи потока. Довольно часто определяющее значение могут иметь биогеохимические процессы, поскольку многие химические элементы и вещества поглощаются и фиксируются биотой в ходе ее жизнедеятельности [69, 87, 167].

Прежде всего, взвесь в силу гидравлических факторов способна осаждаться на дно реки (гравитационное осаждение взвеси). Этот процесс может усиливаться вследствие коагуляции, приводящей к укрупнению тонких (особенно коллоидных) частиц и к их последующему осаждению. Для растворенных форм важную роль играют процессы гидродинамического перемешивания и разбавления, приводящие к их однородному распределению в толще потока и к трансформации соотношения двух основных форм миграции элементов – взвешенной и растворенной. В случае впадения притоков, отличающихся иным, нежели главная река, составом воды, может происходить уменьшение или, наоборот, увеличение валовых концентраций растворенных элементов и их соединений. Не меньшее значение имеют процессы хелатирования и комплексации, сорбции и десорбции, соосаждения и ионного обмена, приводящие как к изменению концентраций и форм миграции элементов, так и к перераспределению последних между различными компонентами водной среды. Переход вещества из раствора во взвесь может происходить при образовании самостоятельной твердой фазы в результате гидролиза, а также при укрупнении агрегатов при совокупном воздействии полимеризации, коагуляции и сорбции на взвеси коллоидных образований [1, 5, 75, 87].

Еще В.И. Вернадский отмечал значимость процессов сорбции, т. е. поглощения из раствора вод химических элементов и их соединений взвешенными и коллоидными частицами, для распределения и миграции вещества в природных водах. Различают абсорбцию и адсорбцию. Если при абсорбции происходит поглощение вещества всем объемом твердого тела, то при адсорбции осуществляется его концентрирование только на поверхности последнего. Очень часто эти явления объединяются под общим названием «сорбционные процессы».

Для речной среды ведущее значение имеет адсорбция, которая возникает в результате поверхностных явлений, протекающих на границе раздела двух фаз (жидкой и твердой). Силы притяжения, действующие на частицу (молекулу, ион), находящуюся на поверхности твердого тела, отличаются от сил, действующих в объеме воды, где они компенсируются со всех сторон другими частицами. На поверхности они не скомпенсированы, и равнодействующая направлена перпендикулярно поверхности внутрь. В результате поверхность получает возможность притягивать и удерживать частицы вещества из раствора. В зависимости от характера

взаимодействия адсорбента с поглощенными частицами различают физическую и химическую адсорбцию. При химической адсорбции между твердым веществом и сорбируемыми частицами происходят химические реакции, в результате которых возникают новые соединения. При физической адсорбции совершается только физическое поглощение частиц на поверхности. Склонность к адсорбции у разных растворенных в воде ионов различная, а в общем случае она пропорциональна заряду иона и величине его радиуса [1].

Два свойства коллоидных частиц имеют значение в сорбции ими химических элементов и соединений: заряд частиц и большая величина поверхности по сравнению с объемом. Коллоидные частицы несут электрический заряд, знак которого не одинаков для различных веществ, но одинаков для всех частиц одного и того же коллоида в определенном растворителе [134]. В речных водах отрицательными электрическими зарядами обладают глинистые и гумусовые коллоиды, кремнезем, диоксид марганца, сульфиды тяжелых металлов и др.; положительными – водные оксиды Fe, Al, Cr, Ti, Zr и др. Наличие одноименных электрических зарядов является препятствием к сближению, агрегации и оседанию коллоидных частиц. Вследствие электростатического притяжения коллоиды адсорбируют противоположно заряженные ионы. В то же время ионы, имеющие тот же заряд, что и поверхность пород, в силу тех же причин занимают место, примыкающее к первому адсорбционному слою. В результате образуется неподвижный двойной электрический слой, состоящий из внутренних потенциалзадающих частиц и внешнего компенсирующего слоя. К двойному электрическому слою примыкает подвижный внешний диффузионный компенсирующий слой, в котором обмен частиц с находящимися в растворе ионами протекает значительно интенсивнее [134]. Согласно данной модели взаимодействие между адсорбируемым веществом и поверхностью адсорбента всегда является чисто электростатическим. Существует также гипотеза, согласно которой адсорбция почти аналогична комплексообразованию в растворе (на поверхности сорбента образуются комплексы). Известные экспериментальные данные согласуются с обеими моделями, т.е. в природных условиях сорбция может, судя по всему, осуществляться обоими механизмами. Активность адсорбции электролитов зависит от заряда иона: чем больше заряд иона, тем интенсивнее он адсорбируется из водного раствора. Однозарядные ионы, имеющие больший радиус, особенно способны к адсорбции.

Коллоиды обладают большой удельной поверхностью, что увеличивает сопротивление жидкости их падению и способствует их нахождению во взвешенном состоянии. Особенно активно адсорбция осуществляется органическим веществом, оксидами и гидроксидами железа, марганца, алюминия, некоторыми глинистыми минералами (которыми, как мы знаем, обогащена речная взвесь), имеющих в силу тонкозернистости

большую площадь поверхности и характеризующихся крайне высокой адсорбционной емкостью и высоким адсорбционным сродством, например, к тяжелым металлам. В табл. 26 приведены данные о площади поверхности и катионообменной емкости тех составляющих почвы, которые играют важную роль в сорбционных явлениях (и практически всегда входят в состав речной взвеси). Главными внешними источниками поступления глинистых минералов и некоторых аморфных веществ в реки являются почвы, тонкие фракции которых обогащены ими (табл. 27).

Таблица 26. Физические свойства почвенных коллоидов [159]

Составляющая почвы	Катионообменная емкость, мэкв/100 г	Площадь поверхности, м ² /г
Органическое вещество	200-400	500-800
Вермикулит	100-150	600-800
Монтмориллонит	80-150	600-800
Диоктаэдрический вермикулит	10-150	50-800
Иллит	10-40	65-100
Хлорит	10-40	25-40
Каолинит	3-15	7-30
Оксиды и гидроксиды	2-6	100-800

Емкость катионного обмена различных веществ изменяется в зависимости от рН и природы ионов, занимающих обменные позиции. Довольно часто оксиды и органические вещества образуют на глинистых частицах своеобразные пленки и характеризуются высокой емкостью катионного обмена [171], однако поверхностный заряд (и, следовательно, емкость) их зависят от значений рН [37]. Как правило, при очень низких значениях рН адсорбции почти нет, при высоких - все катионы активно сорбируются. Для каждого катиона и в меньшей степени для каждого субстрата существует довольно узкий диапазон значений рН, при которых наблюдается переход от почти полного отсутствия адсорбции к почти полной адсорбции. Считается, что в окислительных условиях сорбция на оксидах Fe и Mn и на твердом органическом веществе является более важной, чем, например, на силикатах. Это в существенной мере связано с тем, что в природных водах, содержащих указанные оксиды, одновременно с адсорбцией происходит так называемое соосаждение - процесс включения растворенных в воде веществ в качестве второстепенного компонента в твердую фазу в момент ее осаждения, причем часто невозможно провести четкое различие между адсорбцией и соосаждением, поэтому термин «сорбция» иногда используют достаточно свободно как объединяющий оба процесса [37]. При высоком значении рН адсорбция может сопровождаться гидролизом [129].

Для выведения химических элементов из миграционного потока и формирования илистых отложений, особенно в водах, богатых коллоид-

ным органическим веществом, важную роль играет коагуляция (флокуляция), представляющая собой объединение тонких частиц дисперсной фазы в большие агрегаты вследствие сцепления (адгезии) частиц при их соударениях. Характерный признак коагуляции – появление хлопьевидных образований (флокул), способных либо мигрировать в водной толще, либо формировать коагулянты и осаждаться на дно реки. Факторами, которые влияют на флокуляцию, являются время реакции (время пребывания), распределение энергии перемешивания, свойства раствора (воды) и концентрация веществ [129].

Таблица 27. Глинистые и сопутствующие им высокодисперсные минералы во фракции < 0,001 мм главнейших типов почв [29]

Почвы и породы	Преобладающие или характерные для данной почвы минералы	Сопутствующие минералы
Дерново-подзолистые на моренных и покровных суглинках	Гидрослоды, вермикулиты, минералы монтмориллонитовой группы в различных соотношениях; несиликатные аморфные полуторные окислы. Гидрослоды часто преобладают. Минералы крупных фракций частично разрушены.	Иногда присутствует небольшая примесь каолинита, кварца, редко гетита, гиббсита
Дерново-подзолистые на массивно-кристаллических или хорошо дренируемых осадочных породах	Гидрослоды, вермикулит, каолинит, минералы монтмориллонитовой группы, хлориты.	Аморфные вещества, кварц
Серые лесные на покровных суглинках	Минералы группы монтмориллонита, гидрослоды, вермикулит, иногда небольшая примесь каолинита и хлорита.	Аморфные вещества, кварц
Серые лесные на элювии гранита	Гидрослоды, вермикулит, каолинит, минералы монтмориллонитовой группы	Аморфные вещества, кварц
Черноземы на покровных и лессовидных суглинках	Минералы монтмориллонитовой группы и гидрослоды в разных сочетаниях; первые преобладают над вторыми	Аморфные вещества, кварц, иногда гетит, гиббсит
Черноземы на элювии массивных кристаллических пород	Каолинит, гидрослоды, минералы монтмориллонитовой группы, иногда небольшая примесь гетита, гиббсита.	
Каштановые на суглинках и глинах	Минералы монтмориллонитовой группы и гидрослоды в разных сочетаниях; первые часто преобладают	Аморфные вещества, в том числе небольшое количество полуторных окислов, редко каолинит, иногда гетит, гиббсит

Ионы, адсорбированные на поверхности твердого тела, при определенных условиях получают возможности самопроизвольно обмени-

ваться с ионами, находящимися в растворе. Такой процесс называют ионным обменом. В сущности, это самопроизвольный и обратимый обмен между твердой фазой и раствором, при котором не происходит изменений в структуре твердого тела [4]. Как уже отмечалось, ионообменными свойствами обладают многие минералы и соединения, особенно глинистые минералы, цеолиты, органическое вещество и др. Очень велико значение ионообменных реакций в тех случаях, когда вода контактирует с донными отложениями. В условиях речной среды широко развиты также процессы десорбции, т. е. высвобождения вещества из твердой частицы (взвеси и донных отложений).

Важную роль в поведении многих химических элементов в речных водах играют процессы комплексообразования. С химической точки зрения комплекс представляет собой растворенное вещество, состоящее из 2-х или большего числа менее сложных по структуре веществ, каждое из которых обладает способностью к самостоятельному существованию в водном растворе [62]. Такие соединения называют еще соединениями высшего порядка, или координационными (комплексными) соединениями.

Комплексообразующая способность природной воды (КС) является одной из существенных ее характеристик, связанных с формами миграции металлов. Величина КС показывает «буферную емкость» фильтрованной воды с точки зрения потенциальной возможности токсического воздействия тяжелых металлов на гидробионтов [72-75, 88]. Количественным выражением КС служит концентрация металла, выраженная в моль/дм³, которую может связать данная природная (фильтрованная) вода в виде комплексных соединений. По существу КС выражает концентрацию активных центров, которые не заняты ионами исследуемого металла или же могут быть освобождены в результате конкурирующих реакций при условии, что этот металл образует более прочные комплексы, чем тот, который уже связан с этими центрами. Поскольку активные центры комплексообразующих веществ природной воды могут быть заняты прочно связывающимися металлами, то КС, выраженная через концентрацию какого-либо другого металла, может характеризовать лишь определенную часть КС природной воды. КС одной и той же воды будет иметь различные значения в зависимости от прочности связывания разных металлов, через концентрации которых выражается ее значение. Для некоторых природных вод это различие является довольно существенным, что наводит на мысль о тесной взаимосвязи величин КС с константой устойчивости комплексного соединения того или иного металла. Величина КС не является постоянной для данного водного объекта и может изменяться в пространственно-временном отношении. Существенное влияние на нее оказывает рН среды, поскольку колебания этого показателя в значительной мере отражаются на степени закомплексованности металла. В большинстве случаев последняя возрастает с повышением рН

среды. Между величинами КС и концентрацией растворенного органического углерода практически отсутствует какая-либо корреляционная связь. Предполагается, что в процессах комплексообразования значение имеет не столько валовая концентрация растворенных органических веществ, сколько качественный их состав. Существуют разнообразные химические и биологические методы определения КС природных вод, сущность которых изложена в работах цитируемых авторов.

Дж. Драйвер [37] предлагает разделять существующие в природных водах комплексы на ионные пары и на собственно координационные соединения. Ионные пары (типа CaHCO_3^+ , CuOH^+ и т. п.), образуя дипольное соединение, имеют электростатическую природу и характеризуются небольшими значениями констант устойчивости и могут не всегда присутствовать в растворе речных вод в качестве реально существующих компонентов. Координационные (комплексные) соединения обладают хорошо выраженной структурой и характеризуются, как правило, высокими значениями констант устойчивости. В координационном соединении есть центральный атом (обычно ион металла; его иногда называют комплексообразователем), вокруг которого координируются нейтральные молекулы или кислотные остатки [62]. Эти группы именуют лигандами (т.е. «связанными»), число которых обычно 5 (в большинстве случаев) или 4. Число лигандов, окружающих центральный атом, называют координационным числом. Лиганд занимает около центрального атома (комплексообразователя) координационное место (позицию). Лиганд, занимающий одно координационное место (т.е. имеющий только одну связь, посредством которой он может соединяться с металлом, например, OH^- , NH_3 , Cl^- и т.д.), называется монодентатным. Многие молекулы могут быть связаны с комплексообразователем более чем одной связью; в этом случае лиганды называются полидентатными (бидентатными, тридентатными и т. д.). Известны сложные органические молекулы, которые, будучи лигандом, занимают несколько координационных мест. Координационное число и координационное место - важнейшие характеристики комплексных соединений. В природных условиях имеется множество источников лигандов, необходимых для образования комплексов. В частности, значительная часть присутствующих в природных водах органических веществ, особенно гуминовые и фульвовые кислоты, функционируют в отношении металлов как полидентатные лиганды (табл. 28).

Способность органических веществ к координации с металлами обуславливается в первую очередь присутствием в их составе различных функциональных групп. Так, в состав органических веществ, образующих с ионами металлов комплексные соединения, наиболее часто входят следующие функциональные группы в различных сочетаниях: $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $=\text{NH}_2$, $\equiv\text{N}$, $-\text{SH}$, $=\text{R}(\text{OH})_3$ и другие. Комплексные металлоорганические со-

единения с замкнутыми в цепях лигандами часто называют хелатными («клешневидными»), а соответствующие лиганды - хелатообразующими.

Таблица 28. Гуминовые и фульвокислоты (мгС/л) в речных водах быв. СССР [119]

Зона	С _{ГК}			С _{ФК}		
	1	2	3	1	2	3
Тундра	339	236	130	2266	1989	1048
Лесотундра	435	180	87	3371	2130	1495
Тайга северная	1020	180	114	5438	2218	1572
Тайга средняя	1081	303	75	7173	3588	-
Тайга южная и смешанные леса	669	182	65	4922	3362	2158
Широколиственные леса, лесостепь	305	325	68	2515	2848	961
Степь	98	17	18	1046	602	578

Примечание. 1, 2 и 3 – соответственно весеннее половодье, летняя межень и зимняя межень.

Устойчивость комплексных соединений во многом зависит от свойств адденда, расположенного вокруг центрального атома [62, 154]. Прочность комплексных соединений обычно выражается константой устойчивости: чем выше значение константы устойчивости, тем комплекс более стабилен. Многие катионы, образуя комплексные ионы, перестают осаждаться теми ионами, которые обычно образуют с ними труднорастворимые соединения. При формировании комплексных соединений увеличивается растворимость катионов, изменяется величина E_h , вследствие этого химические элементы приобретают повышенную миграционную способность. В целом хелатные комплексы устойчивее, чем комплексы с монодентатными лигандами. При этом, чем больше комплексообразующих групп содержат полидентатные лиганды, тем более устойчивы комплексы. Хелатные комплексы играют важную роль в геохимии переходных металлов и некоторых многовалентных катионов, содержащихся в природных водах. Фульвокислоты отличаются меньшей молекулярной массой и более высоким содержанием в них полезных функциональных групп, т.е. они хорошо растворимы в воде. Поэтому, следует ожидать преимущественной миграции их комплексных соединений с металлами в растворенных формах. Гуминовые кислоты и соли гуминовых кислот со щелочноземельными металлами – гумиты – имеют низкую растворимость и вероятно в большей степени образуют коллоидные и взвешенные формы. В случае мономерных не ассоциированных соединений, снижение значений рН воды приводит к ухудшению связывания ионов металлов в комплексы из-за подавления диссоциации слабокислотных групп и протонизации аминогрупп. При повышении рН воды степень связывания металлов в комплексы увеличивается, однако при этом может проявляться конкурирующее действие процессов гидролиза, особенно в случае многозарядных катионов. Поэтому для комплексообразования металлов с

органическими соединениями существует некоторый оптимальный интервал кислотности среды, который часто совпадает с рН природных вод.

Образование координационных соединений важно для всей химии водной системы и во многих случаях имеет прямое отношение к токсическому действию и биологической роли различных компонентов. Комплексообразование способно влиять на окислительно-восстановительный потенциал водных систем, что может привести к изменению таких характеристик металла, как растворимость и доступность его для гидробионтов. Оно резко меняет миграционные способности химических элементов и часто увеличивает их устойчивость. В общем случае при координации молекулы или ионы к иону металла всегда существенно изменяется их реакционная способность, при этом химическое поведение металла в координационном состоянии удается предсказать далеко не всегда, присутствие в растворе органических лигандов вносит изменения в адсорбцию многих металлов на оксидах, силикатах и т.п. Так, если ионы в растворе сильно закомплексованы, то их адсорбция может быть подавлена. Однако в некоторых случаях она в действительности даже увеличивается за счет образования тройных металл-лиганд-поверхностных комплексов.

В водотоках огромное влияние на поведение, миграцию и осаждение многих химических элементов, особенно тяжелых металлов, оказывают гумусовые вещества, прежде всего, гуминовые и фульвокислоты [16-18, 70, 87, 102, 177]. Ведущая роль гумусовых веществ в указанных процессах объясняется совокупностью свойств, которые они проявляют в водных экосистемах [70]:

1. Высокая комплексообразующая способность гумусовых веществ (ГВ), зависящая от их химического состава и строения их макромолекул. Присутствие в молекулах ГК и ФК большого числа различных функциональных группировок, в том числе кислотных, обуславливает наличие в их составе так называемых активных центров координации, связывающих металлы в прочные комплексы хелатного типа. Значительная устойчивость и высокомолекулярный характер гуматных и фульватных комплексов с тяжелыми металлами способствует преобладанию этих форм металлов в водах, содержащих достаточные количества ГВ.

2. Способность ГВ существовать в водной среде в виде частиц различной степени дисперсности (растворенные, коллоидные, взвешенные). Полидисперсный состав ГВ определяется интервалом молекулярных масс отдельных фракций и не является постоянным. Изменение компонентного состава вод, величины рН и других факторов может приводить к увеличению или уменьшению степени ассоциации ГВ в растворе. В соответствии с этим будут наблюдаться изменения в соотношении основных форм миграции ГВ. В результате комплексообразования координационные соединения металлов приобретают миграционные свойства.

3. ГВ обладают высокой адсорбционной способностью. Благодаря полифункциональному и полидисперсному характеру молекул гумусовые вещества могут адсорбироваться на коллоидных частицах полигидроксидов железа, марганца и алюминия, а также на поверхности глинистых материалов, образуя более сложные миграционные формы металлов.

Движущийся водный поток постоянно обменивается веществом с донными отложениями. Химические элементы могут поступать из отложений (особенно илистых) в водную толщу при взмучивании и ионном обмене с придонной водой, в результате молекулярной диффузии из иловых вод и механического нарушения границы раздела вода/отложения под действием биологических и гидродинамических факторов. Кроме того, при развитии значительных скоплений илов диагенетические процессы в их толще могут создавать восстановительную (чаще всего, глеевую) среду, которая способствует переходу некоторых элементов в другое валентное состояние и их концентрированию в иловых водах, откуда, в силу указанных выше причин, они способны мигрировать в придонные воды и затем включаться в основной миграционный поток.

4.3. Речная взвесь и ее геохимическая роль

Важной характеристикой речных вод является их мутность, отражающая содержание взвешенных в воде твердых веществ (количество речной взвеси). Геохимическое значение речных взвешенных частиц, особенно коллоидных, очень велико. Речная взвесь определяет многие гидрофизические характеристики воды; она связана с целым рядом других показателей состояния речной воды или оказывает влияние на них. Взвешенные органические частицы используются микроорганизмами для питания и защиты. Цветность воды во многом определяется присутствием коллоидных (особенно гуминовых) веществ. Установлена связь между высокой мутностью воды и ее привкусом и запахом. Оптические свойства воды во многом зависят от количества и состава взвешенных в ней веществ. Например, альbedo мутной воды по сравнению с прозрачной возрастает в 2-3 раза; увеличиваются также поглощение видимых лучей и коэффициент их преломления, снижается прозрачность воды [22]. Как правило, чем выше мутность, тем сильнее поглощаются ультрафиолетовые лучи, что способствует увеличению теплосодержания, но препятствует проникновению солнечного света, а это, в свою очередь, тормозит процессы фотосинтеза и оказывает существенное влияние на гидрохимический режим и биологическую жизнь водотока, вплоть до прямого токсического эффекта на гидробионтов [163]. Наконец, как уже отмечалось выше, взвесь играет огромную роль в миграции химических элементов в реках.

Универсальные классификации речных вод по мутности отсутствуют, поскольку этот показатель зависит от многих факторов и характеризуется пространственно-временной изменчивостью даже в пределах одной географической зоны. Например, зональные значения мутности воды р. Пахры (Московская область) по многолетним данным составляют в весенний период 50-100 мг/л, в летне-осенний - 10-25, в зимний - до 10 мг/л. Для малых равнинных рек возможна следующая группировка их по мутности воды (в межень): содержание взвеси менее 10 мг/л - воды с малой мутностью, 10-30 - со средней мутностью, 30-60 - с повышенной мутностью, 60-100 - с высокой мутностью, более 100 мг/л - воды с очень высокой мутностью.

Поскольку движение частиц в турбулентных потоках имеет неравномерный и неустановившийся характер, то, как правило, значения мутности речных вод существенно изменяются по длине и живому сечению реки. В малых и средних реках вертикальный градиент концентрации взвешенных веществ в водном потоке прямо пропорционален вертикальной составляющей пульсационной скорости потока, т. е. обычно мутность возрастает от поверхности ко дну, что обусловлено увеличением количества крупных фракций взвеси. Однако для тонких частиц ($< 0,1$ мм) в условиях турбулентности скоростей течения градиент концентраций может быть невысок, т. е. они распределяются относительно равномерно в толще потока. Таким образом, при неоднородном составе взвеси соотношение между ее различными фракциями значительно меняется по глубине реки. Распределение взвеси по ширине и длине реки характеризуется еще большей сложностью, что обусловлено характером течения, особенностями русловой эрозии, впадением притоков и т. д. [91].

Как мы уже знаем, в природных условиях мутность речных вод определяется интенсивностью эрозионно-денудационных процессов, в свою очередь контролирующихся многими факторами [123]. Именно поэтому для многих рек основную часть взвеси составляют минеральные частицы, представляющие собой главным образом продукты эрозии почв, берегов, донных отложений. Количество взвешенных в воде органических веществ в значительной степени обуславливается интенсивностью развития в речных водах микроорганизмов, прежде всего бактериопланктона и фитопланктона. В особую группу могут быть выделены волокнистые частицы, например, асбестовые волокна.

В большинстве случаев гранулометрический состав речной взвеси неоднороден (табл. 29). В составе взвеси крупных равнинных рек доля частиц размером менее 0,01 мм достигает 36%, хотя одновременно доля фракций 0,25-0,05 мм может составлять более 44% [109]. Гранулометрические характеристики взвеси по длине равнинных рек определяются транспортирующими условиями, которые могут сохраняться приблизительно одинаковыми практически на всем протяжении русла. Увеличение

мутности и одновременно огрубление состава взвеси происходит в периоды половодий и паводков. Имеющиеся данные показывают, что реки тундры отличаются большей крупностью взвешенных наносов и их малой сортированностью (табл. 30).

Таблица 29. Гранулометрический состав взвеси р. Волги в районе г. Чкаловска, % [109]

Горизонт отбора пробы, м	Размер частиц, мм			
	1 – 0,5	0,5 – 0,2	0,2 – 0,1	< 0,1
0,30-0,10	10,00	30,00	50,00	10,00
0,70-0,50	10,0	30,00	50,00	10,00
1,50-1,10	10,00	60,00	20,00	10,00
1,70-1,60	-	69,24	23,07	7,69
1,80	-	77,78	11,11	11,11
1,90	-	70,00	20,00	10,00
2,00	8,33	75,00	8,33	8,34
2,10	-	85,00	10,00	5,00
2,20	17,91	70,14	10,44	1,51
2,30	-	88,00	8,00	4,00
2,40	2,12	82,97	12,76	2,15

Таблица 30. Медианный диаметр взвешенных и влекомых речных наносов в ландшафтных зонах равнин быв. СССР, мм [35]

Зоны	Наносы	
	Взвешенные	Влекомые
Тундра и лесотундра	0,15	-
Тайга, смешанные леса	0,066	1,62
Широколиственные леса	0,035	0,34
Лесостепь	0,034	0,48
Степь	0,057	0,67
Полупустыня	0,066	2,33
Смешанные зоны	0,039	3,35

Минералогический состав взвеси в существенной степени определяется характером преобладающих горных пород, зависит от рельефа водосбора и климатических условий [30, 46, 113]. Тем не менее во взвеси обычно доминируют кварц и глинистые минералы (табл. 31, рис. 20). Например, во взвеси Дуная в составе легкой фракции (< 0,001 мм) на долю глинистых минералов (иллит, хлорит, монтмориллонит, каолинит) приходилось 58%, кварца 30%, магнетита-ильменита 15,2%, гидроокислов железа 11%, полевых шпатов – 7%. В составе тяжелой фракции присутствовали эпидот (15%), роговая обманка (13), пирит, марказит (10), лимонитизированные обломки (10), гранат (10), измененные обломки (7), моноклинный пироксен (4), биотит (4%) [36]. Указанные факторы отражаются и на петрохимическом составе взвеси, которая с данной точки зрения занимает промежуточное положение между осадочными породами и почвами (табл. 32).

Таблица 31. Минеральный состав взвеси рек быв. СССР, % [46]

Минерал	Пелитовая фракция	Общая проба
Кварц	27	44
Хлорит	20	11
Кальцит	9	12
Полевые шпаты	11	6
Гидрослюда	21	22
Монтмориллонит	8	3
Каолинит	4	2

Примечание. Приведены средние данные для 14 рек СССР.

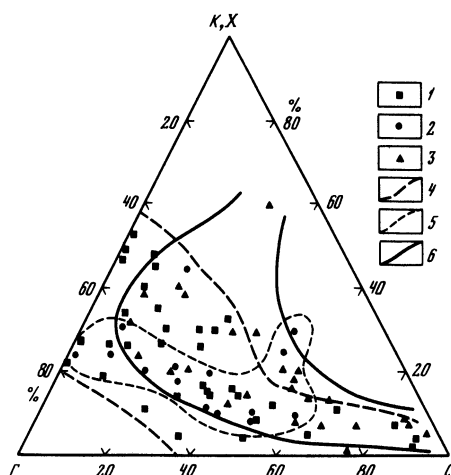


Рис. 20. Минеральный состав глинистого материала твердого стока рек [30]

Данные по рекам: 1 – бореальных областей и некоторым малым рекам горных территорий, 2 – аридных и семиаридных областей бореального, субтропического и тропического поясов, 3 – гумидных и семигумидных областей субтропического - тропического поясов; поля содержаний минералов рек: 4 – бореальных, 5 – аридных и семиаридных, 6 – гумидных и семигумидных областей. Г – гидрослюды, С – смектитовый компонент, К, Х – каолинит, хлорит

Таблица 32. Средний химический состав взвеси рек мира, %

Компонент	Реки мира [31]	Реки мира [174]	Реки умеренной и холодной [174]	Реки мира [168]	Почвы мира, среднее	Осадочные породы континентов
SiO ₂	54,80	60,3	62,87	64,8	70,8	51,07
TiO ₂	0,67	0,97	0,82	-	0,76	0,76
Al ₂ O ₃	15,65	16,98	13,58	15,1	13,45	19,72
Fe ₂ O ₃	7,28	7,36	6,40	9,50	5,43	4,76
MnO	0,14	0,16	0,17	-	0,11	0,086
MgO	2,07	1,82	2	2,32	1,04	2,22
CaO	3,52	4,08	6	4,03	1,93	3,56
Na ₂ O	1,35	0,96	1,16	1,48	0,85	0,89
K ₂ O	1,81	2,53	2,73	2,4	1,64	2,75
P ₂ O ₅	0,14	0,29	0,25	-	0,18	0,18

В речной взвеси, как правило, более 50% органического вещества представлено битумоидами; гумусовые вещества обычно присутствуют в следовых количествах [6]. Углерод углеводов во взвеси рек северных широт достигал около 15% от общего количества ВОВ; общее содержание взвешенного углерода (C_B) - 0,34-3,2 мг/л. Речной взвесью хорошо адсорбируются бактерии и вирусы.

Строение, состав и геохимические особенности аллювиальных отложений

Аллювий - один из наиболее широко распространенных генетических типов континентальных отложений, встречающихся в осадочных образованиях практически любого геологического возраста [136, 138]. В большинстве случаев он представляет собой гетерогенное осадочное образование, алло- и автохтонные компоненты которого отражают различные физические, химические и биохимические процессы, приводящие к его формированию. Главными факторами, контролирующими строение и стратиграфию аллювия, в том числе, насыщенность разреза русловыми песчаными отложениями и их взаимосвязь друг с другом, являются [71]: а) частота миграций и перемен русла; б) скорости аккумуляции пойменных отложений, которая уравнивает тектонические опускания; в) отношения ширины пояса русловых блужданий к ширине поймы.

Общие схемы формирования аллювия

Общая схема накопления аллювиальных отложений в русле типичной равнинной меандрирующей реки обычно описывается следующим образом. На стрежневых участках прямолинейных отрезков речного русла откладывается относительно крупный материал (в первую очередь влекомый), а более мелкий переносится и осаждается ближе к берегам, где течение замедляется (рис. 21, 22). В излучинах русловой поток прижимается к вогнутому берегу, где образуются поперечные циркуляционные токи, которые в верхних слоях потока направлены от выпуклого берега к вогнутому, а в нижних - противоположно. Поперечные токи размывают вогнутый берег и выносят осадочный материал к выпуклому берегу, где формируется прирусловая отмель, полого наклоненная от коренного берега в сторону реки. Отмель несколько сдвинута вниз по течению относительно вершины выпуклости коренного берега. Обычно в прижатом к вогнутому берегу стрежне потока накапливается крупный материал, а на отмели аккумулируется более мелкий. В дальнейшем этот

процесс приводит к постепенному продвижению русла в сторону вогнутого берега и наращиванию русловых отложений со стороны выпуклого берега в виде наклонных слоев.

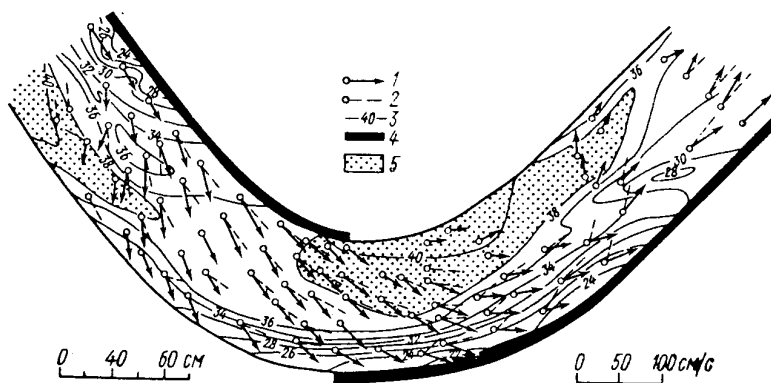


Рис. 21. Скоростное поле потока и рельеф дна русла на излучине (по З.М. Великановой)

1 – поверхностные скорости; 2 – донные скорости; 3 – горизонталы в русле; 4 – берега, возле которых расположилась зона ускоренного течения; 5 – прирусловые отмели (побочни перекатов)

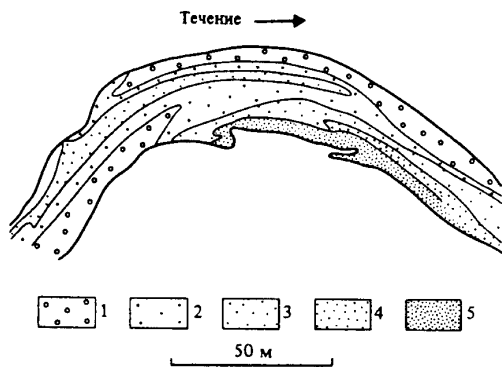


Рис. 22. Распределение размеров зерен вдоль меандры на р. Саут-Эск в Шотландии (Bridge et al., 1976 [71])

1 – гравий; 2 – очень крупный; 3 – крупнозернистый; 4 – среднезернистый; 5 – тонкозернистый

Ширина прирусловой отмели увеличивается до тех пор, пока русло продолжает отступать от выпуклого берега. Нарастание отмели происходит как бы скачками, преимущественно в периоды половодий, причем по

русловому краю отмели образуется из отлагаемого материала каждый раз новый прирусловой вал. Серии таких валов, протягивающихся в пределах прирусловой отмели в виде субконцентрических дуг, формируют так называемый гривистый микрорельеф. В вертикальном разрезе русловой аллювий характеризуется сменой залегающих в основании более крупно-обломочных отложений стрежневой фации располагающимися над ними менее крупнозернистыми отложениями фации русловой отмели. На спаде паводка в пределах русловой отмели отлагаются тонкие илестые отложения, а при дальнейшем понижении уровня воды она выходит на поверхность. На русловых отложениях горизонтальным слоем залегают отложения пойменной фации, образующиеся в периоды половодий и паводков. Поскольку скорость потока здесь меньше, чем в главном русле, то пойменная фация представлена преимущественно мелкими, часто илестыми и песчано-илестыми отложениями. В строении аллювия участвуют также отложения стариц (оставленных рекой участков русла). Эти отложения вложены в русловой аллювий, сложены в основном тонкими илестыми, песчано-илестыми и органогенными отложениями и часто перекрыты пойменным аллювием.

Особенности формирования аллювиальных отложений и обстановок аллювиального осадконакопления рассмотрены в работах Е.В. Шанцера, А.А. Лазаренко, В.А. Кузнецова, Ю.А. Лаврушина и ряда других исследователей [47, 58, 59, 64, 65, 66, 127, 136-139, 160]. В.В. Ламакин [67, 68] предложил различать три динамические фазы аллювиальной аккумуляции: а) инстративную, соответствующую углублению долины (водный поток врезается в коренные породы, вынос резко преобладает над аккумулярованием осадочного материала, но тем не менее часть его задерживается в русле и выстилает поверхность возвышающегося над дном потока цоколя коренных пород); б) перстративную, соответствующую состоянию, когда уровень ложа потока с течением времени не изменяется (поток длительное время располагается на одном уровне, коренной цоколь срезается в результате боковых перемещений русла и поверхность коренных пород всюду в долине приводится на уровень максимальных глубин реки); в) констративную, соответствующую накоплению материала, когда ложе потока постепенно приподнимается в результате увеличения мощности аллювия (дно русла отделяется от поверхности коренных пород успевшей накопиться толщей аллювиальных отложений). Как правило, в основу большинства классификационных схем осадконакопления положен физический принцип: первостепенное значение имеют гидродинамические условия осадконакопления (табл. 33), тогда как геохимические условия (и ведущие геохимические процессы) аллювиального литогенеза практически не рассматриваются. Чаще всего описываются типичные для конкретной динамической обстановки (русло, пойма, старица и т. д.) парагенезы аутигенных минералов и ассоциации гипергенных образований (табл. 34).

Таблица 33. Характерные для аллювиальной обстановки процессы и их производные [127]

Процессы	Производные процессов
Образование проток и русел	Поверхности размыва. Остаточные отложения – глиняная щебенка, древесина, конкреции, грубый обломочный материал, переотложенная фауна
Меандрирование	Прирусловые валы. Изменение глубины поверхности осадконакопления: изменение размеров зерен в вертикальном разрезе, изменение размеров текстур в вертикальном разрезе. Долинные отложения
Однонаправленный поток	Формы рельефа дна: песчаные волны и валы - слои с плоскостным типом косой слоистости, дюны - мультяная косая слоистость, знаки ряби: языковидные и осложняющие. Перенос обломочного материала: скачкообразно (сальтация, размер зерен от 100 до 750 мкм), интенсивная турбулентность во взвешенном состоянии, положительная скошенность – высокая степень сортированности. Мелкая текстура и поверхностные структуры: расположение частиц, некоторые следы столкновения, частицы изометричной и удлиненной формы
Сезонные максимумы стока	Песчаная пачка, мощность которой равна глубине русла. Быстрое отложение материала вслед за периодом максимального стока. Раздельное отложение материала в пределах русел и пойменной равнины
Периодические изменения скорости осадконакопления	Тонкая горизонтальная слоистость. Прирост отложений
Химизм вод pH ~ 6,8 Eh ~ +0,4 Минерализация > 5‰	Дисперсия глин. Разрушение обломков, представленных закисными соединениями железа. Гидролиз калия и магния. Разрушение иллита и хлорита. Кремнистые алюминиевые, железистые и органические коллоиды. Ограниченные количества организмов

Таблица 34. Минеральные диагенетические новообразования в современных аллювиальных отложениях Днепра, Десны и Оки [66]

Отложения	Типичный парагенез аутигенных минералов	Присутствующие аутигенные минералы
Болотные	Гидроксиды Fe, сульфиды Fe, сидерит, кальцит, вивианит	Гидротроилит, мельниковит, пирит, гидрогетит, аморфный гидроксид Fe, гидроксиды Mn, лейкоксен, кальцит, сидерит, вивианит, β-керченит, босфорит (?*), пидит (?)
Старичные	Сульфиды Fe, кальцит, вивианит	Гидротроилит, мельниковит, пирит, гидрогетит, аморфный гидроксид Fe, гидроксиды Mn, лейкоксен, опал, кальцит, сидерит, вивианит, β-керченит, босфорит (?), пидит (?)
Субаральные, поймы	Гидроксиды Fe и Mn, аутигенное глинистое вещество	Гидротроилит, мельниковит, пирит, гидрогетит, аморфный гидроксид Fe, гидроксиды Mn, аутигенное глинистое вещество
Русловые заиленные	Гидроксиды Fe, сульфиды Fe, кальцит	Гидротроилит, мельниковит, пирит, гидрогетит, аморфный гидроксид Fe, гидроксиды Mn, кальцит, сидерит (?), вивианит (?)
Русловые отмельные пески	Гидроксиды Fe	Гидротроилит (?), гидрогетит (?), аморфный гидроксид Fe, кальцит (?)

* Минералы, диагностированные не вполне достоверно.

Достаточно схематично аллювиальные обстановки осадкообразования рассматриваются в известных геохимических классификациях эпигенетических процессов зоны гипергенеза [96] и геохимических условий осадконакопления [160]. Так, А.И. Перельманом [96] намечены два основных типа эпигенетических процессов, характерных для аллювиальных обстановок: бескарбонатный глеевый (аллювий во влажном климате) и карбонатный глеевый (аллювий в лесостепях и северных степях). При бескарбонатном оглеении образуется значительное количество органических кислот, происходит сильный вынос кальция, железа, фосфора и более слабый вынос кремнезема, калия, натрия. Для карбонатного оглеения характерна активная миграция кальция, магния, фосфора, а также марганца, соединения которого выпадают из раствора на участках более высокого окислительного потенциала. Интенсивность выноса и аккумуляции железа ниже, чем при бескарбонатном оглеении. Установлено, что в аллювии рек гумидной зоны карбонаты обычно содержатся в небольшом количестве, но оказывают заметное влияние на значения рН отложений. Как правило, в фациальном профиле аллювия суммарное содержание карбонатов уменьшается от русловых отложений к пойменным, а затем опять возрастает в старичном аллювии (табл. 35). Для большинства фаций аллювия в целом характерно тяготение карбонатов к наиболее тонким фракциям отложений, что свидетельствует об их образовании за счет осаждения взвесей.

Таблица 35. Карбонаты в современном аллювии Днепра, Десны и Оки [66]

Отложения	СО ₂ , %, пределы
Заиленные отложения русла	0,5-1
Крупнозернистые отложения пристержневой фации	0,1-0,5
Пески русловых отмелей	0,05-0,12
Прирусловых валов	0,02-0,42
Собственно пойменная фация	до 0,05
Старичные	0,5-2
Аллювиально-пролювиальные	1,3-1,5

Для речных вод можно предложить следующее разделение их по значениям рН: 1) сильноокислые воды с рН < 5,5; 2) слабоокислые воды - 5,5-6,5; 3) нейтральные - 6,5-7,5; 4) слабощелочные - 7,5-8,5; 5) сильнощелочные воды с рН > 8,5. Обычно в

природных условиях речные воды характеризуются преимущественно слабощелочной или нейтральной средой [8]. В свою очередь, в зависимости от значений Eh выделяют три основных типа геохимических обстановок, свойственных водным системам [98, 141]: 1) окислительную (кислородные воды) - характеризующуюся значениями Eh +(100-150) мВ, присутствием свободного кислорода, а также целого ряда элементов в высшей форме своей валентности; 2) переходную окислительно-восстановительную (глеевые воды) - определяемую величинами Eh +100 - 0 мВ, неустойчивым геохимическим режимом и переменным содержанием сероводорода и кислорода; в этих условиях протекает как слабое

окисление, так и слабое восстановление целого ряда металлов; 3) восстановительную (сероводородные воды) - характеризуемую значениями $Eh < 0$. Окислительно-восстановительные и кислотно-щелочные условия в значительной мере определяют потенциальную подвижность химических элементов в аллювиальной обстановке осадконакопления (табл. 36).

Таблица 36. Подвижность химических элементов в гипергенных условиях [156]

Подвижность	Условия среды			
	окислительные	кислые	нейтральные до щелочных	восстановительные
Очень высокая	Cl, J, Br, S, B	Cl, J, Br, S, B	Cl, J, Br, S, B, Mo, V, U, Se, Re	Cl, J, Br
Высокая	Mo, V, U, Se, Re, Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra, Zn	Mo, V, U, Se, Re, Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Ca, Na, Mg, F, Sr	Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra
Средняя	Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, As, Cd	As, Cd	As, Cd	-
Низкая	Si, P, K, Pb, Rb, Ba, Be, Bi, Sb, Ge, Cs, Tl, Li	Si, P, K, Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi, Sb, Ge, Cs, Tl, Fe, Mn	Si, P, K, Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi, Sb, Ge, Cs, Tl, Fe, Mn	Si, P, K, Fe, Mn
Очень низкая до неподвижной	Fe, Mn, Al, Ti, Sn, Te, W, Nb, Ta, Pt, Cr, Zr, Th, TR	Al, Ti, Sn, Te, W, Nb, Ta, Pt, Cr, Zr, Th, TR	Al, Ti, Sn, W, Nb, Ta, Pt, Cr, Zr, Th, TR, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Al, Ti, Sn, Te, W, Nb, Ta, Pt, Cr, Zr, Th, TR, S, B, Mo, V, U, Se, Re, Zn, Co, Cu, Ni, Hg, Ag, Au, Li, Rb, Ba, Be, Sb, Ge, Cs, Tl

Для речных (естественных) условий наиболее типична окислительная (кислородная) обстановка, значительно реже встречается (в речных илах) глеевая и восстановительная (рис. 23, 24). Для речных отложений, согласно имеющимся данным [58, 66], значения pH уменьшаются: а) в ряду «русловая—пойменная—старичная фация», б) в пределах одной и той же фациальной обстановки с уменьшением размера частиц отложений (пески—супеси—глины), в) в пределах одной и той же фациальной обстановки и одного литологического типа отложений с возрастанием заиленности или заболачивания, г) в крест простирания речной долины от русла в глубь поймы, д) при переходе от субаквальных к субаэральным условиям.

Аллювиальное осадконакопление идет под знаком хорошо выраженной механической дифференциации, которая осуществляется главным образом по направлению от русла в глубь поймы, в меньшей степени, вдоль направления речной долины [66]. Как показано А.А. Лазаренко, механическая дифференциация от русла в глубь поймы создает типичный фациально-седиментационный профиль аллювия: пристрежневая зона - русловая отмель - прирусловой вал - приречная пойма - внутренняя пойма - вторичный водоем поймы - старица - болотные почвы и торфяники.

В пределах первых четырех фациальных обстановок механическая дифференциация осадочного материала проявляется в наиболее ясной форме. Для остальных обстановок характерно заметное влияние автохтонного материала.

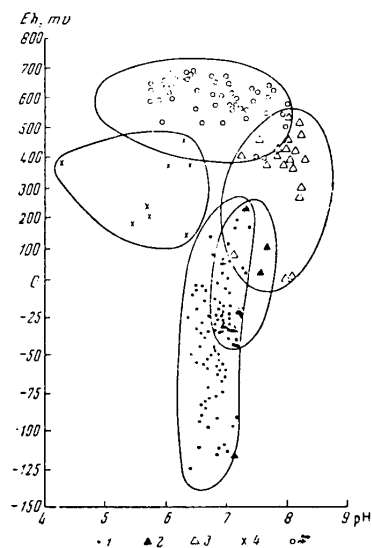


Рис. 23. Физико-химическая характеристика современных аллювиальных отложений Днепра, Десны и Оки [66]

1 – отложения водоемов старичного типа; 2 – субаквальные заиленные отложения русла; 3 – субаквальные отмытые песчаные отложения русел; 4 – болотные отложения; 5 – субаэральные отложения поймы (и осушенных русловых отмелей)

Латеральная механическая дифференциация аллювиальных отложений обуславливает изменение их гранулометрического состава, количества минералов тяжелой фракции, содержаний химических элементов и соединений, а также сортировку минералов по их размеру, удельному весу, форме. Это проявляется в медленном перемещении вниз по течению крупнозернистых отложений, а также в изменении степени их сортировки и разрушении (механическом и в меньшей степени химическом) менее устойчивых минералов (особенно полевых шпатов), что приводит к увеличению содержания в отложениях более устойчивых минералов (кварц, циркон, рутил, турмалин, ильменит, лейкоксен, пирит и др.). На участках расширений характерно появление глинистого и алевроитового материала.

В.А. Кузнецов [58] считает, что классификации аллювиальных обстановок осадконакопления должны учитывать весь комплекс геохимических процессов и условий и согласовываться с геологическими фациями. Он типизирует обстановку аллювиального литогенеза на основе выделения лито-геохимических фаций, т. е. отложений, состав и свойства которых отражают особенности процессов и среды осадконакопления (табл. 37).

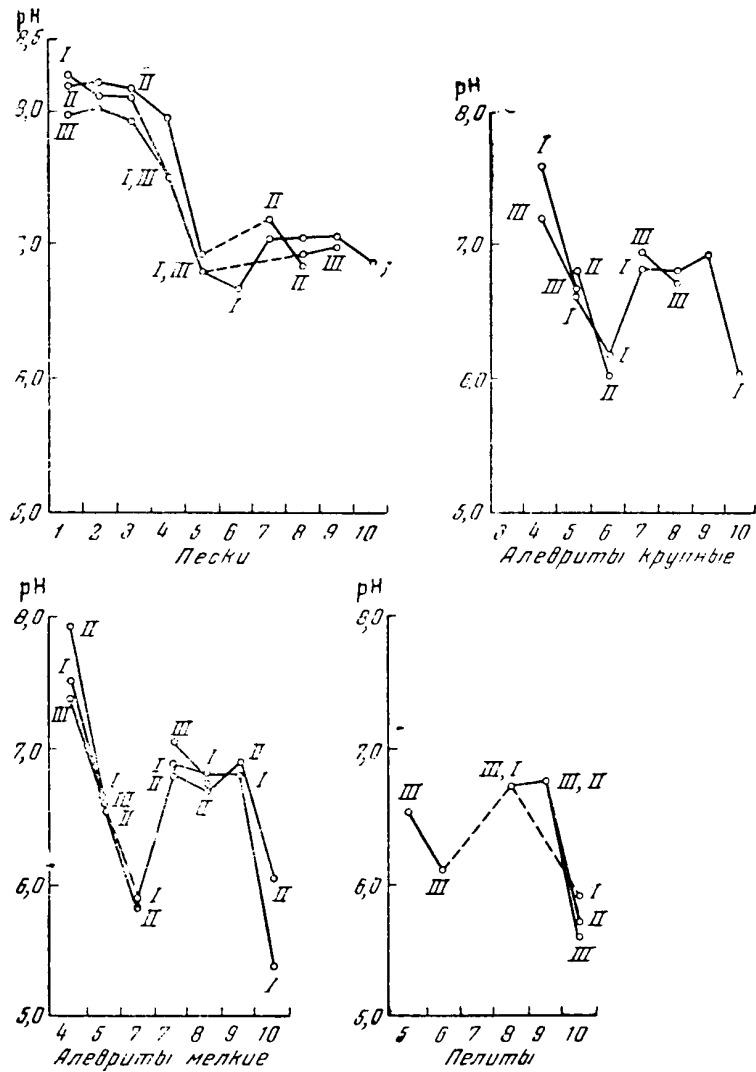


Рис. 24. Средние значения рН в фациальном профиле современных аллювиальных отложений [66]

Реки: I – Днепр, II – Десна, III – Ока; фации: 1 – плёсы, 2 – перекаты, 3 – русловые отмели, 4 – прирусловые валы, 5 – приречная пойма, 6 – внутренняя пойма, 7 – вторичные водоемы поймы, 8 – небольшие старицы и краевые части крупных стариц, 9 – центральные части крупных стариц, 10 – болотные почвы и торфяники

Таблица 37. Фациальные комплексы аллювиальных отложений (бассейн Припяти) [58]

Литогеохимические фации и их характеристики					
Фация	Типоморфные элементы, минералы, новообразования		pH	Ведущий процесс литогенеза	Аллювиальные фации
	Петрогенные оксиды (%)	Минералы и соединения			
Литогенная	SiO ₂ (93,93)	Кварц, полевые шпаты	8,5-7,5	Механическое накопление грубообломочного материала	Русловые: стрежневая, русловая отмель, прибрежная
	SiO ₂ (93,64), Al ₂ O ₃ (2,68)	Кварц	7,0-5,0	Механическое накопление грубообломочного материала, коагуляция коллоидов	Пойменные: прирусловой вал
Сиаллитно-глинистая	SiO ₂ (87,98), Al ₂ O ₃ (3,36), Fe ₂ O ₃ (1,32)	Глинистые минералы, органическое вещество	6,8-4,5	Механическое накопление грубообломочного материала, коагуляция коллоидов, гидрогенное и биогенное накопление вещества, сорбция	Пойменные: приречной и внутренней поймы
	SiO ₂ (80,20), Al ₂ O ₃ (1,68), Fe ₂ O ₃ (0,91)	Глинистые минералы, органическое вещество	5,0-4,7	Биогенное накопление, механическая аккумуляция тонкообломочного материала	Старичные: затонов, временных протоков
Биогенная	SiO ₂ (75), Al ₂ O ₃ (4,79), Fe ₂ O ₃ (3,53), CaO (0,90)	Органическое вещество, глинистые минералы, карбонаты, гидроксиды Fe	5,0-4,6	Биогенное накопление, коагуляция коллоидов, сорбция, микробиологические процессы	Старичные: собственно старичные
	SiO ₂ (87,9), Al ₂ O ₃ (1,36)	Органическое вещество, опал, гидроксиды Fe, вивинанит, карбонаты	7,0-5,8	Биогенное накопление, коагуляция, сорбция, микробиологические процессы	Болотные: заболоченных старичных и вторичных водосемов пойм, заболоченных почв
Сиаллитно-ферритная	SiO ₂ (60,96), Fe ₂ O ₃ (31,93), Al ₂ O ₃ (5,28)	Гематит, лимонит, железисто-глинистые конкреции	6,0-4,6	Коагуляция коллоидов, синерезис, химические реакции, педогенез	Главным образом пойменная и реже русловая
Сиаллитно-карбонатная	CaO (30,79), MgO (2,70)	Кальцит, доломит, сидерит, глинисто-карбонатные стяжения	7,8-5,0	Коагуляция коллоидов, синерезис, химические реакции	Старичная и пойменная

Литогеохимические фации находятся в определенных отношениях с аллювиальными и типичны, по мнению В.А. Кузнецова, не только для равнинного нормального голоценового аллювия умеренного пояса, но и других климатических зон.

Естественно, что в связи с зональностью геохимических процессов получают развитие также продукты других литогеохимических фаций аллювия: сиаллитно-хлоридносульфатной в зоне пустынь и полупустынь, сиаллитно-аллитной и аллитной во влажных субтропиках и тропиках. В субаридных и аридных ландшафтах речных долин степей, полупустынь и пустынь активно проявлены процессы современного галогенеза [27]. Галогенез проявляется также в экстраконтинентальных холодных регионах, где он связан с криогенной метаморфизацией природных вод, и в ирригационных долинных ландшафтах (вторичное засоление). Аллювий рек засушливых областей, особенно пересыхающих водотоков, отличается повышенной загипсованностью [65]. Специфика проявления гипергенных образований в речных отложениях также во многом определяется ландшафтно-климатическими условиями (табл. 38).

Таблица 38. Ассоциации гипергенных образований в аллювии различных ландшафтно-климатических зон [47]

Зона	Пойменный аллювий	Старичный аллювий
Тундра и лесотундра	Гидроксиды Fe и Mn (?), солонцы (?), карбонаты, кристаллы льда	Гидроксиды Fe (?)
Леса холодного и умеренного климата	Гидроксиды Fe и Mn, карбонаты Ca, реже солонцы, сульфиды Fe	Вивианит, керчинит, карбонаты Ca, гидроксиды Fe и Mn, сидерит, кремни, сульфиды Fe
Степи и саванны	Солонцы и солончаки с гумусом, карбонатами Ca и Na, гипсом, гидроксиды Fe и Mn, сульфиды Fe, кремни	Карбонаты Ca, гипс, сульфиды Fe, реже оксиды Fe
Пустыни и полупустыни	Солончаки с галитом, гипсом, карбонаты Ca и Mg, кремни	Карбонаты Ca и Mg, гипс, галит, мирабилит (?), тенардит (?)
Тропические и субтропические сухие леса	Гидроксиды Fe и Al, карбонаты Ca, реже кремни и солонцы	Карбонаты Ca, гипс (?), гидроксиды Fe и Al, сульфиды Fe
Тропические и субтропические влажные леса	Гидроксиды Fe и Al	Гидроксиды Fe и Al, вивианит, керчиниты (?), сидерит, сульфиды Fe

В речной долине можно выделить субаквальную (свойственная руслу, старичным и болотным водоемам поймы), супераквальную (пойма) и элювиальную (свойственная преимущественно террасам) обстановки осадконакопления, пространственные и возрастные закономерности которых в условиях одной климатической зоны могут быть сведены к следующим основным [58]: уменьшение субаквальных и возрастание супераквальных условий вниз по течению и в крест простираения долин; в субаквальных обстановках влияние на литогенез накопления обломочного материала уменьшается, а биогенного и хемогенного возрастает от стрежня вглубь поймы и от верховьев к дельте; биогеохимические процессы и накопление органических веществ усиливаются с развитием ста-

ричных и болотных водоемов, особенно для рек равнинных и дельтовых областей; с зарастанием стариц и водоемов поймы субаквальная обстановка сменяется супераквальной; в супераквальных условиях преимущественное накопление обломочного материала ослабевает, а биогенного и хемогенного – усиливается от приречной к центральной и притеррасовой частям поймы; элювиальная обстановка характерна для террасовых и повышенных пойменных уровней. В условиях заиленных русловых отмелей, пойм и особенно стариц проявлены современные хемогенные и биогенные процессы минералогенеза (алюмосиликатогенез, опалогенез, кальцитогенез, оксидогенез, глеегенез, активно идет детритогенез; не исключено также развитие сульфидогенеза [27]). С процессами биологической сульфатредукции связано содообразование в лугово-болотных (пойменных) почвах.

Непосредственно в речных отложениях также выделяются несколько характерных физико-химических обстановок, каждая из которых отличается вполне определенными средними значениями показателей условий среды, спецификой диагенетических процессов и характерными парагенезисами минеральных новообразований. Естественно, что наличие указанных обстановок (их смена, чередование) в существенной мере обуславливаются гидродинамической структурой потока и геоморфологическим строением русла и долины. Как правило, накопление речных отложений в пределах различных физико-химических обстановок сопровождается изменением химического состава аллювия и соотношений содержащихся в нем элементов, близких по геохимическим свойствам. Так, отмечается уменьшение модуля $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ в ряду русловой—пойменной—старичный аллювий (табл. 39), что отражает различные гидродинамические условия отложения материала, ведущие к преимущественному накоплению песчаных частиц в русле и глинистых частиц в водоемах пойм и старицах [58]. Фиксируется также возрастание величины отношений $\text{CaO}:\text{MgO}$ в указанном ряду, что связано с благоприятными условиями карбонатообразования в поймах и старицах. Для модуля $\text{K}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}$ отмечается тенденция к увеличению его значений в пойменном и старичном аллювии, что может быть связано с избирательным накоплением калия растительностью и участием последней в формировании состава отложений.

Таблица 39. Величины петрохимических модулей для отложений рек бассейна Припяти [58]

Обстановка	$\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}:\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Na}_2\text{O}$
Русловая	47,27	2,50	0,64	0,19
Пойменная	41,99	2,76	0,36	15,54
Старичная	36,63	2,63	0,46	7,84

Особенности строения аллювия

Строение аллювиальных толщ определяется закономерностями отложения и сортировки осадочного материала в водном потоке и перемещением русла в долине. Наиболее хорошо дифференцированным и типично построенным является аллювий крупных равнинных рек, принадлежащих гумидным зонам (табл. 40). Чем меньше водотоки, чем неустойчивее их режимы и чем резче климатическая обстановка отличается от гумидной в сторону аридной или нивальной, тем менее упорядочена стратификация отложений.

Таблица 40. Схема фациального расчленения современного аллювия [66]

Макрофации	Фации	Субфации и некоторые микрофации
Русловая	Пристрежневая Русловых отмелей Боковых протоков	Субфация плесов Микрофация заиленных плесов Перекаатов Заиленных русловых отмелей Заиленных боковых протоков
Пойменная	Прирусловых валов Приречной поймы Внутренней поймы	Наложённых прирусловых валов
Старичная	Центральных частей крупных стариц Небольших стариц и краевых частей крупных стариц	Ранней озерной стадии стариц Зрелой озерной стадии стариц Стадии зарастания стариц То же самое
Осадки смешанного характера	Вторичных водоемов поймы Пойменных болотных почв и торфяников Аллювиально-пролювиальные осадки	Торфяников Болотных почв

Для строения (и вещественного состава) руслового аллювия большое значение имеют геолого-геоморфологические условия развития реки, поскольку его текстура в существенной степени зависит от формы движения наносов [82]. В частности, на реках с резко выраженным пиком весеннего половодья крупные песчаные гряды сохраняются в рельефе прирусловых отмелей, поэтому при их зарастании формируется ясно выраженная косая слоистость. При медленном спаде половодья и растянутых во времени паводках движение крупных гряд сменяется перемещением более мелких, что обуславливает образование волнисто-линзовидной слоистости аллювиальных отложений. Русловой галечно-валунный аллювий обычно характеризуется отсутствием слоистости. Пойменная фация аллювия наиболее ярко выражена на реках с большим стоком взвешенных наносов. Соотношения между русловой и пойменной

фациями аллювиальных отложений зависят от направленности горизонтальных деформаций.

Согласно Н.И. Маккавееву и Р.С. Чалову [82], можно говорить о двух основных схемах строения аллювиальных толщ, образующихся в процессе горизонтальных деформаций. Первая схема соответствует главным образом продольному перемещению русловых форм (излучин, островов): аллювий в данном случае имеет супесчано-суглинистое строение и практически лишен песчаной русловой фации. Тем не менее в основе образования поймы (острова) лежит песчаная прирусловая отмель (побочень, осередок). Русловая фация оказывается размытой, а в строении поймы преобладают фации илистых кос, заводей и т. д.

Вторая схема возникает в случае поперечного перемещения излучин или регрессивного роста островов. В этом случае аллювиальная толща имеет четкое двучленное строение и включает песчаную русловую фацию и более тяжелую пойменную фацию, а фация заводей имеет подчиненное значение. Обычно старичные фации являются осложняющим аллювиальную толщу элементом. Наиболее широко они образуются при поперечном перемещении русловых форм, когда возникают благоприятные условия для образования стариц. Рассмотренные схемы строения аллювиальных толщ в наиболее чистом виде, по мнению авторов цитируемой работы, проявляются при относительно стабильном продольном профиле реки. В случае же интенсивного накопления возникает сложное наложение разновозрастных аллювиальных толщ вплоть до перекрытия типичной пойменной фации более молодыми русловыми отложениями. При врезании русла возникает переуглубление плесовой ложины возле вогнутого берега излучины, что создает видимость нарушения закономерного изменения мощностей отдельных фаций аллювия, хотя, как подчеркивают авторы [82], на самом деле при развитии вертикальных деформаций происходит лишь наложение на процесс образования аллювиальной толщи двух видов смещения речного русла - в горизонтальной и вертикальной плоскостях. С процессом разрушения и последующего размыва скальных пород, слагающих русло реки, связано формирование так называемого базального горизонта аллювия, часто залегающего в основании аллювиальных толщ [144]. Крупнообломочный базальный слой аллювия на равнинных реках формируется в пределах плесовых ложин, где половодьями и паводками производится размыв дна. Он может быть насыщен пелитовыми частицами, что обусловлено редкой повторяемостью высоких половодий.

Несмотря на то, что аллювиальные отложения имеют сложное строение, обусловленное многократным чередованием русловых, пойменных и старичных фаций в разрезе, обычно заметно преобладает русловая фация (табл. 41). А.Н. Боголюбов [11] различает в русловых отложениях на каждом участке водотока склоновый (денудационный) мате-

риал, поступающий с ближайших участков склона, и осажженный транзитный (седиментационный) материал, поступающий с верхних частей бассейна; их соотношение определяется интенсивностью и направлением эрозионно-аккумулятивной деятельности реки на данном участке.

Таблица 41. Распределение речных отложений Беларуси по фациальному и литологическому признаку, % [58]

Фашия, литологический тип	Припять	Днепр (без Припяти)	Неман	Зап. Двина
Русловая	60,8	62,5	62,5	58,6
Пойменная	14,9	29,3	29,3	35,8
Старичная	24,3	8,2	5,2	5,6
Пески:				
грубозернистые	0,5	1,1	5,3	3,3
крупнозернистые	2,1	0,6	3,4	3,4
среднезернистые	16,0	14,0	19,2	13,8
мелкозернистые	67,1	59,0	62,3	58,5
Супеси	5,5	12,3	4,6	12,0
Суглинки	2,6	1,4	1,3	2,7
Глина	0,6	3,2	1,6	3,4
Илы	0,6	1,8	2,3	2,9
Погребенные почвы, торфяник	5,0	-	-	-

Нормальная мощность аллювиальных отложений обычно определяется разницей отметок дна русла и уровня полых вод [136]. В долинах крупных равнинных рек она достигает 10-30 м и более. Поскольку седиментация в руслах рек отличается весьма изменчивым характером, то абсолютную скорость ее измерить чрезвычайно трудно. При нормальном расходе воды за 24 ч может осадиться 1 м грубого материала, а там, где имеются галечные или песчаные косы - может накопиться осадочное тело мощностью до 5-6 м [61]. Скорость пойменного осадконакопления зависит от геоморфологических условий, варьируясь, например, на некоторых заливаемых поймах крупных рек от 0,02 до 41 см/год. Скорость накопления аллювиальных отложений в р. Волге оценивается в 500-7000 см/тыс. лет (0,5-7 см/год) [59]. Расчеты, выполненные для крупных рек (Миссисипи, Амударья, Рона и др.), показывают [172], что накопление аллювиальных отложений в зависимости от фациальных условий составляет на пойме 68%, на заболоченных равнинах - 14, по берегам и косам - 6, в русле - 12% общего объема отложений в речных долинах.

Гранулометрический состав и минералогические особенности аллювия

Гранулометрический состав речных отложений в определенной мере отражает природные условия водосборного бассейна и формируется

в результате длительного взаимодействия водного потока и русла. Преобразование состава отложений, слагающих активный (поверхностный) слой русла, обусловлено сезонными изменениями водного режима реки, гидравликой потока и степенью насыщенности его осадочным материалом [123]. В период развития половодья, нарастания расходов воды и скоростей течения происходит укрупнение донных отложений и перераспределение процентного содержания частиц разных размеров за счет перехода наиболее мелкозернистых частиц во взвешенное состояние. На спаде половодья крупность наносов уменьшается и в период межени достигает, как правило, наименьших значений. Обычно такого рода закономерности изменения гранулометрического состава отложений наиболее характерны для плесовых участков равнинных рек.

Среди литологических типов аллювиальных отложений, как правило, доминируют мелкозернистые пески, илы явно имеют подчиненное значение и встречаются преимущественно в старицах, затонах, плесах. На прирусловых отмелях часто формируется тонкий слой илистых (супесчано-илистых) отложений (наилков). Для аллювиальной толщи типично увеличение размеров частиц вниз по разрезу. Фиксируется вариация гранулометрического состава для различных фаций и субфаций аллювия (табл. 42-44).

Таблица 42. Гранулометрический состав современных речных отложений бассейна Днепра (без Припяти), % [58]

Фракция, мм	Русловые	Пойменные	Старичные
2-1	4,4	0,6	6,2
1-0,5	6,0	1,80	11,37
0,5-0,25	30,2	15,8	44,5
0,25-0,1	24,2	34,8	17,3
0,1-0,075	26,1	36,1	14,2
0,075-0,01	6,0	6,6	4,1
0,01-0,005	0,9		0,9
0,005-0,001	1,3	0,87*	0,7
< 0,001	0,9		0,7

* Содержание фракции < 0,01 мм.

Таблица 43. Гранулометрические характеристики современных речных отложений бассейна Днепра *

Отложения	Доля физической глины, %	Md, мм	So	Коэффициент дисперсности	Доля фракций, %		
					0,05 - 2 (песок)	0,005 - 0,05 (алеврит)	< 0,005 (глина)
Русло	3,1	0,115	3,3	0,022	91	6,8	2,2
Пойма	0,87	0,094	2,3	-	90	9,7	0,9
Старица	2,3	0,22	4,6	0,014	94	4,6	1,4

* Рассчитано по данным табл. 42.

Таблица 44. Гранулометрический состав современного руслового аллювия, % [66]

Глубина, м	Река	Фракция, мм					
		>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1
Русловая отмель							
0,5	Днепр	0,02	0,26	11,42	60,76	27,34	0,20
0,3	Десна	-	1,00	8,42	64,62	19,30	6,66
0	Ока	3,62	9,98	26,94	54,68	4,66	0,12
Пережат							
2,5	Днепр	2,22	6,94	21,18	47,62	22,02	0,02
2	Десна	-	1,54	8,74	66,90	20,62	2,20
1,6	Ока	2,56	12,32	26,84	55,02	3,18	0,08
Плес							
5,1	Днепр	6,04	6,44	24,16	54,88	8,40	0,08
4,2	Десна	-	2,44	6,84	67,56	22,48	0,68
6,1	Ока	-	-	3,84	93,36	2,54	0,26
Плес заиленный							
3,5	Днепр	-	-	-	2,50	75,88	21,62
4,7	Десна	-	-	2,98	66,44	25,18	5,40
5,5	Ока	0,15	0,24	0,60	4,22	29,35	65,44

Русловая фация аллювия, чаще всего представленная песчаными и песчано-алевритовыми отложениями с включениями гальки, гравия, щебня и дресвы, характеризуется преобладанием неслойчатых разностей отложений, иногда встречаются тонко-горизонтально-слойчатые, флексуобразные, линзовидные текстуры. В изгибах меандр аллювиальные отложения наслаиваются косыми слоями, наклоненными к центру кривизны речной излучины. Отмечаются также косая слоистость и мелкая непараллельная волнистая слоистость. Обычно в русловом аллювии рек умеренного пояса Русской равнины преобладает фракция среднезернистого песка (40-50%); второй по значению является фракция мелкозернистого песка (20-40%); крупный и грубый песок составляют 10-25%; количество гравия и гальки колеблется в пределах от 2-3 до 8-10%; тонкозернистого песка – 1,5-6%, доля пылеватых и глинистых частиц не превышает 2-3% [7]. По данным А.А. Лазаренко [66], в русловой фации рек указанных районов наиболее широкий набор литологических типов отложений характерен для субфации плеса. Коэффициенты сортировки руслового аллювия обычно больше 1,2; коэффициенты асимметрии чаще всего меньше 1. Преобладание в русловом аллювии какой-либо одной фракции в большинстве случаев определяет достаточно выраженную однородность его гранулометрического состава. Однородными по крупности частиц считаются несвязанные грунты (в данном случае - русловые пески), характеризуемые отношением $d_{95}/d_5 \leq 5$, где d_5 и d_{95} - диаметры частиц, меньше которых в данном грунте содержится соответственно 5 и 95% по массе [50]. Ц.Е. Мирцхулава [85] предлагает рассчитывать коэффициент однородности грунта по формуле: $K_0 = d_{CP}/d_{95}$; при $K_0 \geq 0,6$ грунт можно считать практически однородным.

Отложения пойменной фации, как правило, налагают на русловые и отличаются от них мелкоалевритовым или ленточным алевритопелитовым составом. Грубозернистые примеси в основном отсутствуют. Коэффициенты сортировки в основном не больше 2, коэффициенты асимметрии всегда меньше 1. Отложения прирусловых отмелей обычно хорошо сортированы, хотя и имеют на различных участках долины неодинаковый гранулометрический состав [64]. В пойменные участки часто вложены линзы мелкорусловых песчано-алевритовых отложений (отложения стариц). Гранулометрический состав старичных отложений достаточно неоднороден, но отличается заметной долей фракций менее 0,001 мм (4-30%) и 0,01-0,001 мм (20-60%), частицы размером менее 0,1 мм могут составлять до 70-85% и даже больше [66]. Особую разновидность представляют фации вторичных водоемов поймы, образующиеся в пределах пониженных пойменных ложбин.

В русловом аллювии в общем наблюдается обратная зависимость между Md (средним диаметром частиц) и So (коэффициентом сортировки) [66]. Наиболее хорошо отсортированы пески прирусловых валов и отмелей. Пристрелневая фация отличается от фаций отмелей и валов прежде всего более крупным составом отложений, заиленные разности отложений наиболее характерны для отмелей, в меньшей степени – для плесов и прирусловых валов. В пойменных отложениях часто наблюдается прямая зависимость между Md и So , отражающая образование аллювия преимущественно за счет осаждения взвеси. Для старичных отложений значения Md и So находятся в прямой зависимости между собой и контролируются величиной мутности речных вод. В.Е. Рясиной [113] показано, что в современном русловом и пойменном (песчаные разности) аллювии Волги преобладает фракция 0,25-0,1 мм (соответственно до 90% и до 69%), в супесчаной разности пойменного аллювия - фракция 0,1-0,05 (до 50%), затем следует фракция < 0,5 мм; в супесчаной разности старичного аллювия доминируют фракции 0,1-0,05 мм (до 40%) и фракция < 0,01 мм (до 30%), в глинистой разности старичного аллювия преобладает фракция меньше 0,01 мм (до 65%). Естественно, что гранулометрический состав современных отложений на конкретных участках рек может отличаться от среднебассейновых и региональных характеристик (табл. 45-47).

Гранулометрия аллювия во многом определяется гидродинамическими условиями потока. На рис. 25 приведены вариационные кривые распределения веса частиц по их размерам для различных гранулометрических типов отложений одной из прирусловых отмелей р. Вилиги (Северное Приохотье) [84]. Наиболее тонкие песчано-илистые отложения характерны для хвостовой части прирусловой отмели. По мере приближения к ее головной части песчано-илистые отложения постепенно сменяются песчаными, песчано-гравийными, гравийно-галечными и галечно-валунными.

Таблица 45. Гранулометрические характеристики современного аллювия Днепра, Десны и Оки, Md – средний диаметр частиц, мм; So – коэффициент сортировки [66]

Макро-фация	Фация	Субфация, микрофация	Гранулометрические типы отложений						
			Пески		Алевриты		Пелиты		
			Md	So	Md	So	Md	So	
Русло-вая	При-стреч-невая	Перекаатов	0,31-0,40	1,23-1,28	-	-	-	-	
		Плесов	0,30-0,35	1,26-1,32	-	-	-	-	
		Заливных плесов	0,11-0,26	1,36-2,09	0,09	3,80	0,004	4,67	
	Русло-вых отмелей	Заливных отмелей		0,21-0,26	1,25-1,29	-	-	-	-
				0,13-0,14	1,79-2,14	0,02-0,03	1,76-2,22	0,002	3,70
	Боковых проток	Стрежия проток	Отмелей проток	0,29	1,30	-	-	-	-
Заливных проток			0,19	1,28	-	-	-	-	
			0,19	1,44	0,07	1,50	-	-	
Пой-мен-ная	Прирусловых валов		0,14-0,19	1,20-1,21	0,03-0,07	1,76-4,36	0,005	3,70	
	Приречной поймы		0,11-0,14	1,37-1,59	0,03-0,06	1,92-4,16	0,006-0,007	?	
	Внутренней поймы		0,11-0,14	1,36-1,46	0,01-0,06	2,30-3,71	0,004-0,007	?	
Ста-рич-ная	Небольших стариц		0,12-0,21	1,37-1,70	0,012-0,030	1,74-3,60	0,003-0,005	3,20	
	Центральных частей крупных стариц		0,11	1,58	0,012-0,015	2,76-3,19	0,002-0,009	2,72	
Сме-шан-ная	Вторичных водоемов поймы		0,18	1,38	0,003	1,75-4,10	-	-	
	Пойменных торфяников и болотных почв		0,10	1,35	0,01-0,02	2,11-5,5	0,0015-0,002	?	
	Аллювиально-пролювиальные		0,14	1,88	0,03	1,90	-	-	

Примечание. По П.Д. Траску (1932), при So менее 2,5 – отложения хорошо сортированы, при So более 4,5 – плохо сортированы; по Н.М. Страхову (1954), при $So = 1,1-1,5$ – хорошо сортированы, при $So = 2-3,5$ – средне сортированы, более 4 – плохо сортированы; средний диаметр частиц, равный 0,1-0,01 мм соответствует алевриту, менее 0,01 мм – пелиту.

Таблица 46. Гранулометрический состав руслового аллювия некоторых рек

<i>Река Нура, верховья, Центральный Казахстан</i>							
Фракции, мм							
2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,063	0,063-0,04	<0,04	
6,6%	57,4%	30,2%	1,9%	0,5%	0,3%	3,1%	
<i>Река Инсар, верховья, Мордовия</i>							
Фракции, мм							
2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	<0,005
1,2%	19,2%	51,6%	16,2%	5,8%	2,5%	1,7%	1,8%
<i>Река Алатырь, верховья</i>							
Фракция, мм							
2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	<0,005
1,2%	21,3%	58,6%	16,2%	1,8%	0,5%	0,1%	0,3%
<i>Река Пахра, фоновые участки, Московская область</i>							
Фракции, мм							
2-1	1-0,25		0,25-0,1	0,1-0,01		0,01-0,005	<0,005
1,8%	19,8%		52,1%	26,2%		0,5%	0,4%

Таблица 47. Гранулометрические характеристики руслового аллювия*

Река	Физи- ческая глина, %	Md, мм	So	Кoeffи- циент диспер- ности	Доля фракций, %		
					0,05-2 (песок)	0,005-0,05 (алеврит)	< 0,005 (глина)
Инсар	3,5	0,220	2,01	0,018	94	4,2	1,8
Алатырь	0,4	0,253	1,74	0,003	99,1	0,6	0,3
Пахра	0,9	0,081	3,6	0,004	78	21,6	0,4
Сура	0,6	0,251	1,71	0,004	99,2	0,5	0,3

* Рассчитано по данным табл. 46.

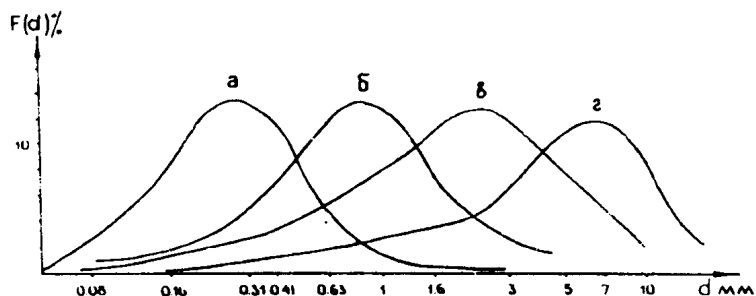


Рис.25. Вариационные кривые гранулометрического состава аллювиальных отложений [84]

а – илесто-песчаные, б – песчаные, в – песчано-гравийные, г – гравийно-галечные

Механическая дифференциация руслового аллювия по речной долине проявляется в медленном перемещении вниз по течению крупнозернистых наносов всех фаций, сопровождаемом истиранием пород, а также в изменении степени сортировки отложений. Последняя обычно имеет противоположные тенденции изменения для отложений, образующихся за счет взвешенного и влекомого материала. На участках озеровидных расширений типично появление глинистого и алевритового материала. Как правило, от верховий рек к их низовьям наблюдается постепенное увеличение доли мелкофракционного материала в составе руслового аллювия.

Ю.Г. Симоновым и соавт. [116] на примере речных бассейнов Восточного Забайкалья показано, что изменение крупности и степени сортированности аллювия вниз по долине связано с двумя основными факторами: гидравлической сортированностью и колебаниями в крупности переносимого со склонов и из притоков материала. В табл. 48 показано изменение крупности и сортированности речных наносов по порядкам водотоков. Если на водотоках 1, 2, иногда 3 порядков не отмечается ак-

тивного грядового транзита наносов, то при возрастании водности в более крупных потоках фиксируются грядовые формы перемещения аллювия.

Таблица 48. Изменение крупности (среднего медианного размера, в мм, и сортированности) аллювия по порядкам водотока (σ - среднеквадратическое отклонение) [116]

Порядок водотока	Md	σMd	S_0	σS_0
3	25,2	17,7	0,27	0,12
4	45,3	17,1	0,42	0,12
5	19,9	12,8	0,27	0,019
6	25,6	16,5	0,28	0,08
8	43,3	28,5	0,27	0,096

На водотоках 4 и 8 порядков наблюдается резкое укрупнение аллювия, что, по мнению авторов, связано с началом грядового транзита и вымыванием мелких и средних по крупности наносов. На водотоке 8 порядка укрупнение аллювия обязано резкому возрастанию поступления материалов со склонов и из притоков в результате прохождения

волны регрессивной эрозии. По мере нарастания мощности потоков, дренирующих различные территории, несмотря на геологическую неоднородность, наблюдается выравнивание гранулометрического состава аллювия по разным литологическим провинциям. Таким образом, активный русловой транзит обломочного материала на значительных по водности реках быстро нивелирует различия, вызванные особенностями выветривания и склоновых перемещений.

В 1974 г. в ГГИ Г.А. Петуховой выполнено районирование по крупности донных отложений равнинной части Европейской территории быв. СССР и предгорий Кавказа, в основу которого положены принципы генетического единства территорий и относительной однородности природных условий в пределах выделяемых районов [123]. При выделении районов учитывались прежде всего геоморфологические и гидрологические факторы, а собственно районирование территории осуществлялось на основании зависимостей между средними многолетними значениями гранулометрического параметра d_{50} (мм) и модулем среднего многолетнего годового стока воды M_Q [л/с/км²]. Параметр d_{50} представляет собой размер частицы наносов обеспеченностью 50% на гранулометрической кривой. Зависимости $d_{50} = f(M_Q)$ строились по данным наблюдений на малых и средних реках с площадями водосборных бассейнов от 100 до 25000 км², сток воды которых формируется в пределах одной природной зоны. Были установлены шесть основных видов указанной зависимости (рис. 26), соответствующих различным геоморфологическим районам, границы которых показаны на рис. 27.

Районирование состава речных отложений, согласующееся с эрозионным районированием рассматриваемой территории, осуществленным Н.А. Бобровицкой, обнаружило тенденцию уменьшения параметров

их крупности при движении с севера на юг в пределах равнинной территории Европейской части (районы I-VI, табл. 49). Наиболее отчетливо указанная закономерность прослеживается на примере изменения параметров, характеризующих среднюю крупность наносов (d_{50}) и их мелкозернистую часть. Эта тенденция уменьшения крупности русловых отложений в определенной мере соответствует известной широтной зональности эрозионных районов, выделенных К.Н. Лисицыной, а также соотносится с данными М.П. Лысенко и Н.И. Маккавеева, указывающих на зональность гранулометрического состава четвертичных отложений Русской равнины [123].

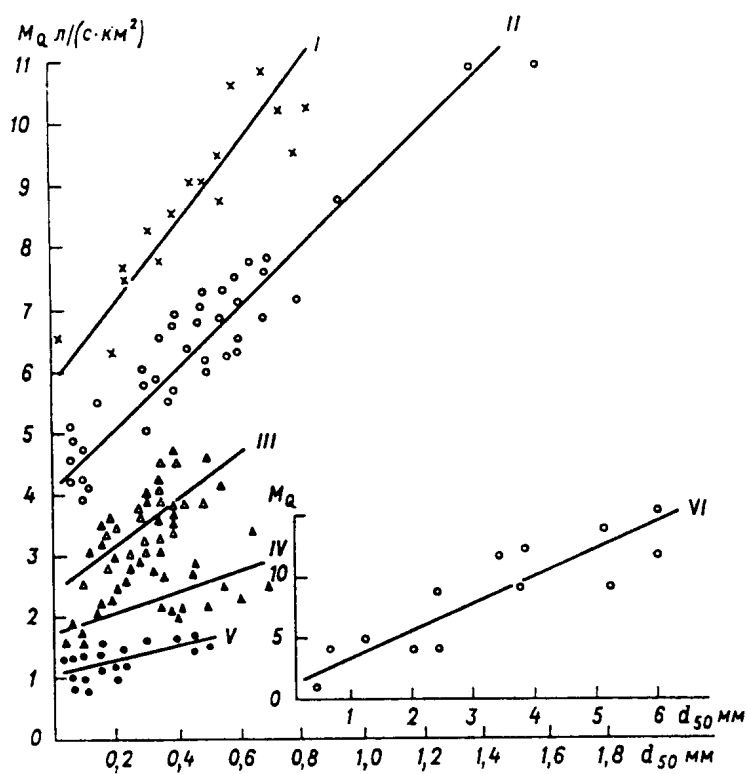


Рис. 26. Зависимости гранулометрического параметра донных отложений d_{50} от среднего многолетнего стока воды M_Q [123]

I – VI - номера районов (см. рис. 27).

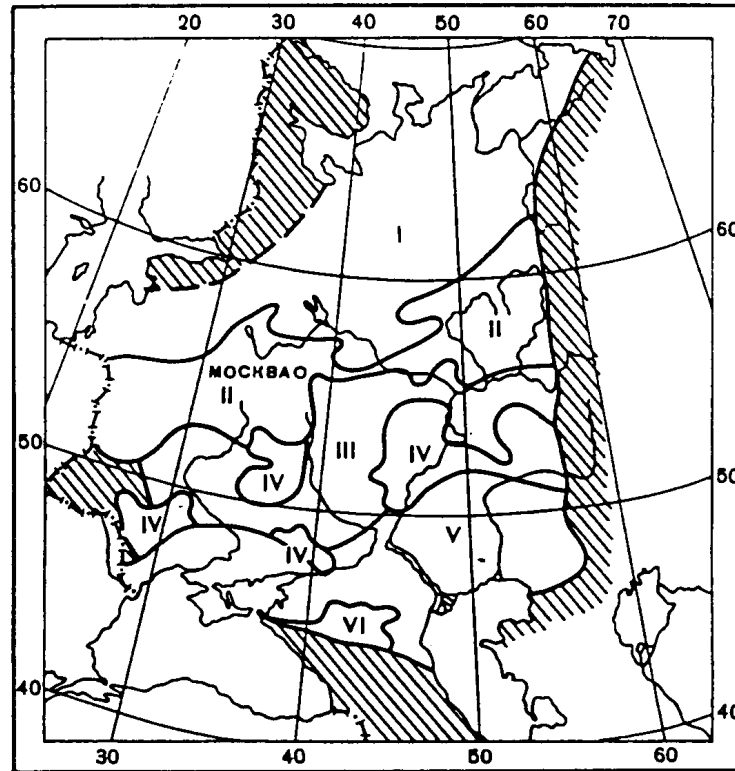


Рис. 27. Схема районирования европейской части быв. СССР по крупности донных отложений рек (I-VI - номера районов; заштрихованная территория не рассматривалась) [123]

Минеральный состав аллювия зависит от условий осадконакопления, а также от гранулометрического состава отложений [66, 93, 94, 113]. Тем не менее, до сих пор не установлено надежно, какие минералы или ассоциации минералов следует считать диагностическими для аллювиальной среды [127]. Исследования, выполненные на крупных равнинных реках Русской равнины, показали, что в современных русловых отложениях присутствуют около 80 терригенных минералов, но многие из которых встречаются в единичных случаях [66]. В большинстве случаев в составе аллювия резко преобладает кварц (до 95%), присутствуют полевые шпаты (5-10%), обломки пород (до 2%), среди минералов легкой фракции встречаются также ортоклаз, микроклин, плагиоклаз,

глауконит; в тяжелой фракции доминирует ассоциация ильменит-гранат-роговая обманка-эпидот (встречаются ставролит, силлиманит, дистен, циркон, рутил, турмалин и др.).

Таблица 49. Районирование европейской части быв. СССР по гранулометрическому составу донных отложений рек

Район	Характеристика	d_{50} , мм
I	Северный склон Русской равнины в пределах тундровой и лесной зон. Преобладают слабохолмистые равнины с высотами 100-200 м. Четвертичные отложения представлены главным образом валунными суглинками и флювиогляциальными песчано-глинистыми разновидностями. Продольные профили рек хорошо выработаны, в верхнем и среднем течении преобладают однорукавные немеандрирующие русла, в нижнем течении больших рек наблюдается меандрирование и пойменная многорукавность.	0,46; $d_{90} = 17$
II	Белорусская гряда, Смоленско-Московская, Валдайская, Среднерусская (северная часть) возвышенности, Северные Увалы и север Вольно-Подольской возвышенности. Моренные возвышенности сложены несортированными валунными и песчанистыми суглинками, местами флювиогляциальными песками. Среди моренных холмов встречаются песчаные задровые пространства. Преобладает свободное меандрирование рек; в пределах Белорусской гряды, Смоленско-Московской и Среднерусской возвышенностей встречаются однорукавные немеандрирующие русла рек. На составе аллювия сказывается неоднородность и плохая сортировка моренных отложений.	0,43 (0,01-1,60)
III	Днепровско-Донецкая и Окско-Донская водно-ледниковые и аллювиальные равнины. Четвертичные отложения представлены разнородными пылеватыми и глинистыми песками с прослоями и линзами гравелистых песков. Для рек района характерно свободное и незавершенное меандрирование. Русловые отложения достаточно однородны по составу.	0,32 (0,12-0,55)
IV	Эрозионные возвышенности лесостепной и степной зон (Среднерусскую, приволжскую, Общий Сырт, южную часть Вольно-Подольской, Придепровскую, Донецкий кряж), лежащие за пределами распространения оледенений. В четвертичных отложениях преобладают лёсс и лёссовидные суглинки.	0,30 (0,04-0,70); $d_{90} = 2,8$
V	Причерноморская и Прикаспийская низменности, степная и полупустынная зона. Морские отложения представлены песками, переслоенными глинами; континентальные - глинами, перекрытыми лёссом мощностью до 20 м. Преобладает свободное и незавершенное меандрирование рек; в западной части района протекают немеандрирующие реки с однорукавным руслом. Донные отложения рек состоят из мелких песчано-пылеватых и глинистых частиц.	0,18
VI	Ставропольская возвышенность в предгорьях Кавказа. Коренные породы почти всюду перекрыты лёссовидными суглинками. Большинство рек свободно меандрирует. Аллювиальные отложения представлены галькой, песками и глинами, плохо сортированы.	2,9 (0,30-6,0)

В аллювии обнаружены также разнообразные диагенетические минеральные образования (карбонаты, гидроксиды и фосфаты железа, гидроксиды марганца, гидроксиды и оксиды титана, карбонаты и сульфаты кальция, алюмосиликаты, сульфиды). В современных речных отложениях бассейна Днепра основными минералами легкой фракции являются кварц (50-95%) и полевые шпаты (5-20%); в тяжелой фракции преобладают роговая обманка, гранаты, ильменит [58]. В русловом аллювии фоновых участков реки Пахры (Московская область) в легкой фракции также преобладал кварц (до 70-72%), присутствовали полевые шпаты (13-14%), кислые плагиоклазы (4-5%), микроклин (2-3%) и другие минералы; в тяжелой фракции – роговая обманка (23-25%), черные рудные минералы (21-23%), эпидот (~18%), гранат и циркон (по 6-8%) и др. Встречались карбонатные новообразования и измененные минералы и обломки пород.

А.А. Лазаренко [66] для современного аллювия бассейнов Днепра, Десны и Оки установлено отчетливое увеличение содержания кварца от мелких фракций к крупным. Полевые шпаты, особенно плагиоклазы, имеют обратный характер распределения; в тонких фракциях наибольшую роль среди полевых шпатов играет ортоклаз, в более крупных – микроклин. Другие «легкие» компоненты – глауконит, кальцит, слюды, хлорит, выветрелые зерна и глинистые минералы, углистое вещество, растительный детрит – концентрируются преимущественно в мелких фракциях отложений. Во фракции 0,10-0,05 мм возрастает количество пелитоморфных карбонатов и кремней, а также кремнисто-глинистых агрегатов. С утончением отложений увеличивается содержание тяжелой минеральной фракции. Количество ильменита и магнетита растет от крупных фракций до частиц размером 0,1-0,063 мм и затем несколько снижается. Минералы метаморфических пород (гранат, дистен, ставролит и др.) обнаруживают отчетливую концентрацию в наиболее крупных фракциях; количество амфиболов и пироксенов также увеличивается с возрастанием размерности фракций. Минералы группы эпидота, слюды и хлорит тяготеют к тонким фракциям. Во фракции аллювия меньше 0,001 мм определено около 10 минералов, из которых преобладает ассоциация: гидрослюда – монтмориллонит – каолинит – кварц. Встречались также галлуазит, кальцит, сидерит, пирит, гидроокислы железа, смешанно-слоистые глинистые образования.

Исследование минерального состава алевритовой фракции аллювия Волги показало, что чем тоньше фракция, тем меньше в ней содержится граната, циркона и больше роговой обманки, слюды и апатита (рис. 28, табл. 50). Как правило, выход тяжелых минералов увеличивается от более тонких пород – старичных илов – к более грубым русловым пескам, а также во фракции 0,1-0,05 мм всех литологических разностей современного аллювия. Так, во фракции 0,25-0,1 мм тяжелые минералы

составляют доли процента, в крупноалевритовой фракции (0,1-0,05 мм) их содержания возрастало до 3-9%, причем во фракции 0,1-0,05 мм, выделенной из илов старичного аллювия, преобладают обломки минералов, диаметр которых приближается к нижнему пределу фракции. В этой же фракции, выделенной из русловых песков, доминируют минералы, диаметр которых уже тяготеет к верхнему пределу фракции.

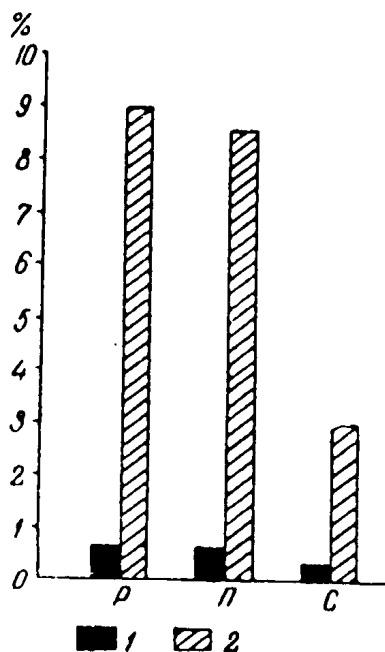


Рис.28. Выход тяжелых минералов, аллювий Волги [113]

1 – фракция 0,25-0,1 мм; 2 – фракция 0,1-0,05 мм; аллювий: Р – русловой; П – пойменный; С – старичный

Во всех фациальных и литологических разностях современного волжского аллювия значительную долю тяжелых минералов составляют непрозрачные минералы (ильменит, лейкоксен, магнетит). Содержание их уменьшается от русловых песков (40%) к старичным илам (до 28%). Количество метаморфических (гранат, дистен, силлиманит, ставролит) и устойчивых минералов (циркон, сфен) также уменьшается от песков русловой фации к илам стариц.

Обратная зависимость, т. е. уменьшение содержания от илов стариц к пескам русла, наблюдается в распределении турмалина, роговой обманки, апатита, минералов группы эпидота и рутила. Наибольшее количество пироксенов обнаружено в супесях пойменного аллювия (в песчаной и алевритовой фракциях). Среди обломочных зерен легкой фракции

преобладают кварц и полевые шпаты (ортоклаз, в меньшей степени плагиоклаз, слюда, кремний). Максимальные концентрации кварца во фракции 0,25-0,1 мм характерны для русловых отложений; старичные отложения характеризуются высоким количеством вивианита, плагиоклаза, слюды. В алевритовой фракции содержания кварца и слюды возрастают от руслового аллювия к старичным илам, а количество полевых шпатов и кремния, наоборот, уменьшается.

Таблица 50. Минеральный состав аллювия Волги, ниже Самары и Сызрани, % [113]

Минерал	Фракции, мм					
	0,25 – 0,1			0,1 – 0,005		
	Русло, песок	Пойма, песок и супесь	Старица, ил	Русло, песок	Пойма, песок и супесь	Старица, ил
	Легкая фракция					
Кварц	78,6	54,4	48,0	43,0	53,5	50,4
Ортоклаз	10,0	19,5	12,7	31,0	26,0	18,0
Плагиоклазы	2,2	2,5	8,1	2,2	4,2	8,8
Слюда	0,8	2,6	5,5	5,8	5,4	6,8
Кремень	1,6	5,5	1,8	5,2	2,6	1,2
Агрегатные сростки	6,8	12,5	10,1	12,0	8,3	11,5
Вивианит	-	-	13,8	-	-	3,3
	Тяжелая фракция					
Ильменит	5,4	4,0	3,3	21,5	20,0	13,0
Лейкоксен	22,8	18,0	21,4	5,3	4,0	3,7
Магнетит	2,3	1,5	1,4	8,1	7,2	5,6
Лимонит	12,0	12,2	12,1	4,4	5,1	5,7
Циркон	0,2	+	1,0	5,0	4,2	3,8
Турмалин	1,0	1,4	-	1,2	2,3	3,0
Рутил (кристаллы)	-	-	-	1,4	2,2	1,7
Рутил (натечные зерна)	-	+	-	0,5	1,2	1,8
Сфен	1,4	0,7	1,0	1,5	1,1	0,8
Апатит	-	-	+	0,7	0,6	1,2
Гранат	4,9	3,2	2,5	7,0	4,5	3,2
Дистен	2,2	1,4	1,0	1,0	1,0	0,7
Ставролит	3,0	2,0	2,3	1,0	0,8	0,5
Силлиманит	0,8	0,9	0,9	0,4	0,3	0,2
Андалузит	+	+	-	-	-	-
Ромбический пироксен	1,4	1,8	1,6	0,8	0,8	1,5
Моноклинный пироксен	1,8	3,0	2,0	1,8	2,4	0,6
Эпидот	28,5	35,0	33,0	26,0	25,0	33,6
Циозит	1,0	3,0	2,8	2,4	3,3	2,2
Роговая обманка	11,3	11,9	13,0	10,0	14,0	18,0

В современном аллювии рек Прикамья основными минералами большого удельного веса (>4,5) являются ильменит, хромит, гематит, магнетит, циркон, а минералами среднего удельного веса (3,5-4,5) - ставролит, гранаты, лимонит, кианит, лейкоксен, рутил. В группе минералов малого удельного веса (<3,5) резко преобладает эпидот, в меньшем количестве распространены пироксены, турмалин, амфиболы, сфен, обломки пород [93, 94]. При переходе от грубых отложений к мелкообломочным в песчаных фракциях уменьшается количество минералов среднего и большого удельного весов. В крупноалевритовой и мелкоалевритовой фракциях содержание минералов среднего и большого удельного весов меняется по литологическим типам аллювия неодинаково для разных рек, что, видимо, определяется разными гидродинамическими условиями обстановки осадконакопления. Для русловых отложений максимальное со-

держание тяжелых минералов обычно приходится на фракцию 0,25-0,17 мм; для пойменных и старичных - на фракцию 0,17-0,1 мм (табл. 51).

Таблица 51. Тяжелые минералы в современном аллювии Прикамья, % [94]

Минерал	1	2	3	4	5	6	7
Эпидот	52,4	62,5	69,3	75,6	65,8	51,3	50,5
Ставролит	19,7	13,3	5,5	3,0	2,6	2,3	1,4
Гранат	11,5	7,2	4,3	4,1	4,4	3,0	4,9
Кианит	3,9	2,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2
Турмалин	2,5	2,1	1,0	1,1	0,9	0,5	0,5
Лейкоксен	1,3	1,7	1,5	1,4	2,0	2,5	1,5
Амфиболы	0,8	0,8	0,9	1,1	1,5	1,3	0,8
Пироксены	0,6	0,8	1,6	0,6	2,0	2,1	1,5
Лимонит	3,5	4,4	3,9	2,7	3,6	8,4	12,9
Сфен	0,2	0,2	0,5	0,6	0,7	1,2	1,4
Рутил	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,9	1,4
Ильменит	1,3	1,5	2,6	2,4	4,4	9,2	14,4
Хромит	1,2	1,4	3,1	2,5	3,3	5,3	2,7
Циркон	0,3	0,3	0,5	0,3	0,9	2,0	2,9
Магнетит	0,3	0,3	0,9	0,6	1,2	1,6	0,3
Гематит	0,3	0,6	3,0	2,7	4,1	7,8	1,7
Слюда	-	-	-	+	0,1	0,2	0,3

Примечание. Количество образцов - 185; за 100% принято содержание 17 наиболее распространенных минералов; 1 - песчано-гравийно-галечные отложения с крупным песком; песок: 2 - среднезернистый с примесью гравия, 3 - среднезернистый, 4 - средне-мелкозернистый, 5 - мелкозернистый, 6 - суглинок и супесь, 7 - глина.

С речными отложениями связано формирование россыпей, т. е. промышленные скопления зерен полезных минералов в обломочных аллювиальных отложениях [32]. Н.А. Шило (1981) различает две группы россыпей: пойменные и внепойменные. Первые (щеточные, русловые, косовые) непосредственно связаны с деятельностью современных водотоков, вторые (террасовые, террасоувальные, водораздельные) - приурочены к отложениям, которые на современной поверхности суши выведены из сферы деятельности флювиальных процессов. В плане аллювиальные россыпи обычно лентообразные, по отношению к направлению долины продольные. Встречаются линзовидные, изометричные, гнездовые россыпи. Длина аллювиальных россыпей от нескольких сотен до нескольких десятков километров, ширина от нескольких десятков метров до нескольких сотен метров, иногда нескольких километров [32].

Гранулометрический состав россыпей изменяются от грубообломочного до существенно песчаного (мелкие валуны 5-10%, галька 30-80%, гравий 10-40%, песок 10-30%, ил 5-10%, глина 1-5%). Как правило, полезные минералы наибольшей плотности (осмистый иридий, железистая платина, золото) концентрируются в приплотиковой части аллювия, иногда проникая по трещинам в плотик на глубину до 1-1,5 м, и образуют

россыпи толщиной от десятков сантиметров до нескольких метров. Минералы средней плотности (касситерит, вольфрамит, колумбит, танталит) образуют россыпи толщиной несколько метров, приуроченные к нижней части руслового аллювия. Минералы малой плотности (ильменит, циркон, монацит, алмаз и др.) распределяются по всему русловому аллювию, образуя россыпи мощностью 10-12 м и более. Россыпи с высоким уровнем промышленного содержания (TiO_2) характеризуются относительно равномерным распределением полезных компонентов, с низким содержанием золота, платины, алмазов и др. - неравномерным, с тенденцией к неравномерности по мере увеличения размеров долин.

Геохимические особенности руслового аллювия

Современные аллювиальные отложения представляют собой относительно сложные физико-химические системы, характеризующиеся широким диапазоном окислительно-восстановительных (Eh от -200 мВ до +600 мВ) и кислотно-щелочных (рН от 4 до 9) условий [8]. Основным контролирующим фактором, по мнению авторов цитируемого обобщения, является состав отложений. Химический состав последних, обладая в каждом конкретном случае спецификой, тем не менее практически всегда отличается высокими содержаниями кремнезема (до 70-80% и более) и глинозема (около 5-6%), что является следствием минералогического состава аллювия (преобладание кварца, полевых шпатов, присутствие в тонких фракциях глинистых минералов). Содержание прочих петрогенных оксидов обычно невелико (табл. 52-54).

Таблица 52. Основные компоненты химического состава руслового аллювия, %

Компонент	Песчаные породы**	Нура	Пахра	Инсар	Алатырь	Сура
SiO_2	73,58	79,90	78,50	83,63	80,47	79,27
TiO_2	0,34	0,24	0,47	0,33	0,43	0,49
Al_2O_3	6,55	6,66	4,58	5,22	5,60	5,84
Fe_2O_3	2,10	1,28	2,68*	2,03	2,33	2,89
FeO	0,94	1,41	-	0,57	0,80	1,00
MnO	0,044	0,06	0,07	0,078	0,056	0,06
CaO	5,23	1,35	3,17	0,78	0,68	0,78
MgO	1,94	0,62	1,27	0,37	0,59	0,79
Na_2O	0,30	2,94	0,71	0,56	0,68	1,08
K_2O	2,36	3,36	1,61	1,05	1,48	1,68
P_2O_5	-	0,07	0,27	0,19	0,18	0,18
H_2O	-	0,26	0,82	1,37	1,45	1,55
ППП	2,22	1,73	2,07	3,66	4,56	3,56
$S_{свободная}$	--	< 0,1	0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,1
$S_{общая}$	-	< 0,1	0,04	< 0,1	< 0,1	< 0,1
CO_2	-	0,13	2,06	0,50	0,56	0,76

* сумма $Fe_2O_3 + FeO$; ** четвертичные отложения, Русская платформа, по Б. Ронову и др.; ППП – потери при прокаливании.

Таблица 53. Петрохимические модули русловых отложений

Модуль*	Песчаные породы	Инсар	Алатырь	Сура
Гидролизатный, $Al_2O_3+TiO_2+Fe_2O_3+FeO/SiO_2$	0,08	0,05	0,06	0,07
Алюмокремниевый, Al_2O_3/SiO_2	0,05	0,04	0,04	0,04
Титановый, TiO_2/Al_2O_3	0,05	0,06	0,08	0,08
Калиевый, K_2O/Al_2O_3	0,36	0,23	0,29	0,31
Плагиоклазовый, Na_2O+CaO/K_2O	4,2	2	2,2	1,8
Зрелости, SiO_2/Al_2O_3	19	27	24	23
Степени дифференциации, SiO_2/Na_2O+K_2O	43	67	50	37
Показатель зрелости, $Al_2O_3/SiO_2+MgO+K_2O+Na_2O$	0,05	0,04	0,04	0,04
Закисный, FeO/Fe_2O_3	0,99	0,6	0,8	0,8
Окисления, Fe_2O_3/FeO	1,02	1,6	1,3	1,3
SiO_2/R_2O_3	16	22	19	18
K_2O/Na_2O	4,7	1,3	1,5	1
CaO/MgO	1,95	1,6	0,9	1,4
Ферритизации, Fe_2O_3+FeO/SiO_2	0,02	0,01	0,02	0,02

Примечание. Рассчитано по данным табл. 52; здесь и далее расчет модулей осуществлялся согласно [41].

Таблица 54. Средний состав современных речных отложений, % [58]

Фация	Река	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	CO_2
Русло- вая	Зап. Двина	90,23	0,85	4,33	1,00	0,47	0,67	1,27	0,02
	Неман	91,02	1,44	3,02	0,63	0,41	0,63	1,14	0,04
	Днепр	92,58	0,95	2,86	0,48	0,17	0,52	1,24	0,13
	Припять	93,93	0,75	1,86	0,31	0,20	0,22	0,56	-
Пой- менная	Зап. Двина	85,56	1,59	5,20	1,43	0,75	0,79	1,53	следы
	Неман	87,17	2,12	3,51	0,60	0,31	0,60	1,41	0,03
	Днепр	87,23	2,05	4,49	0,68	0,29	0,63	1,53	0,23
	Припять	87,98	1,32	3,36	0,55	0,59	0,39	0,92	0,12
Старич- ная	Неман	71,76	2,83	6,69	0,78	0,49	0,62	1,76	следы
	Днепр	88,25	1,55	3,50	0,32	0,12	0,50	1,26	0,24
	Припять	84,16	2,20	3,22	0,66	1,20	0,39	1,00	0,51

Иногда в русловом аллювии отмечаются относительно повышенные количества соединений титана, железа, органического вещества, а также соединений кальция, магния и калия. Фракция отложений мельче 0,001 мм, как правило, отличается пониженным содержанием кремнезема и повышенным количеством оксидов алюминия и железа. В этих фракциях обычно всегда присутствует дисперсный кварц (табл. 55-58).

Таблица 55. Средний химический состав литологических разностей современных речных отложений бассейна Днепра, % [58]

Осадок	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	ППП
Песок	90,25	1,54	3,83	0,48	0,09	0,50	1,35	0,06	1,47
Супесь	79,40	3,39	6,48	0,77	0,22	0,60	1,76	0,24	6,12
Глина	68,30	5,29	10,10	0,93	0,30	0,80	2,36	0,36	10,10
Наиллок	65,23	3,44	7,14	1,14	0,30	0,70	1,38	0,78	18,75
Торф	39,94	1,73	4,02	2,12	0,15	0,30	1,00	1,10	50,30

Таблица 56. Петрохимические модули речных отложений бассейна Днепра*

Модуль	Песок	Супесь	Глина	Наиллок	Торф
Алюмокремниевый	0,03	0,05	0,09	0,07	0,06
Калиевый	0,39	0,29	0,25	0,21	0,28
Плагиоклазовый	1,1	0,8	1,2	2,1	3,9
Зрелости	40	21	12	15	17
Степени дифференциации	67	46	30	42	41
Показатель зрелости	0,02	0,05	0,08	0,06	0,06
SiO ₂ /R ₂ O ₃	32	16	9	12	13
K ₂ O/Na ₂ O	1,8	1,9	1,9	1,4	2,2
CaO/MgO	3	2,5	1,7	2,9	9,6
Силификации	19	10	6	7	6

* Рассчитаны по данным табл. 55

Таблица 57. Химический состав различных фракций современных речных отложений бассейна р. Припяти, % [58]

Фракция, мм	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	H ₂ O
0,5-0,25	98,84	0,77	0,21	0,85
0,25-0,1	97,36	1,30	0,27	0,44
0,1-0,075	97,23	2,01	0,33	0,48
0,075-0,01	94,43	3,50	0,48	0,57
0,01-0,005	62,26	11,74	4,53	5,08
0,005-0,001	47,04	15,33	6,74	6,45
< 0,001	44,81	15,51	7,87	8,18

Таблица 58. Химический состав современного аллювия, %, фракция < 0,001 мм [66]

Отложения, река	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Дисперсный кварц
Заиленный плес, Ока	46,87	0,75	18,04	9,49	0,31	1,75	5,10
Русловая отмель, Десна	48,37	0,70	16,50	11,05	0,27	1,78	1,58
Приречная пойма, Днепр	47,59	0,73	17,18	11,37	0,34	1,75	4,44
Внутренняя пойма, Днепр	48,90	0,71	15,93	10,82	0,22	0,88	2,80
Старица, Днепр	46,78	0,65	14,45	7,60	0,49	2,40	4,30
Старично-болотные, Ока	45,03	0,78	18,88	9,11	0,22	1,64	3,51

Дифференциация химического состава аллювия в диагенетическую стадию особенно четко раскрывается в связи с развитием процессов вторичного минералообразования [58, 66, 115, 134]. В частности, в процессе гипергенного минералообразования при аллювиальном литогенезе происходит концентрирование Si при формировании опала и халцедона, Fe - гематита, гидрогематита, лимонита и др., Mn - вада, псиломелана, оксигидроксидов. Ca и Mg - кальцита, доломита, K и Na - глинистых минералов, P - вивианита, S - при образовании пирита и т. д. Особенно отличаются повышенными содержаниями различных минеральных новообразований отложения заиленных плесов, затонов, пойм и стариц, что оказывает существенное влияние на их химический состав. По давнему, но

справедливому и сейчас замечанию А.А. Лазаренко, минеральные новообразования в современной аллювии изучены слабо, тогда как их роль в процессах аллювиального осадконакопления, особенно в условиях техногенеза, велика.

Органическое вещество, присутствующее в речных отложениях, очень разнообразно и, как правило, генетически сходно с распространенным в почвах и осадочных породах (табл. 59). В общем случае оно включает неизменные и частично измененные остатки тканей растений и животных (растительный детрит, корни, бактериальные и грибные клетки), продукты разложения их микроорганизмами, а также тонко рассеянное коллоидное вещество. Как правило, содержание органических веществ в современной аллювии невысокое. Значения показателя ППП (потеря при прокаливании) чаще всего варьируются в пределах 1-5%. В аллювии рек Европейской равнины содержания $C_{орг}$ составляют в песках 0,04-0,52% , алевритах 0,34-1,55%, пелитах 0,30-2,88% [66]. Наименьшими содержаниями $C_{орг}$ отличаются песчаные русловые отложения (0,03-0,04%), затем следуют песчаные отложения прирусловых валов (0,10-0,11%).

Таблица 59. Содержания органических компонентов в осадочных породах [14]

Компоненты	Диапазон концентраций
Органическое вещество в целом	0 – 2% мас. долей
Кероген	0 – 2% мас. долей
Углеводороды	0 – 4000 г/т
Углеводы	0 – 700 г/т
Жирные кислоты	0 – 100 г/т
Аминокислоты	0 – 100 г/т
Пигменты	0-5 г/т

В собственно пойменных отложениях фаций приречной и внутренней поймы количество $C_{орг}$ составляет в среднем в песках 0,14-0,23%, в крупных алевритах 0,36-0,95%. В мелких алевритах 0,46-1,24%, в пелитах 0,90-1,81%. Максимальные значения $C_{орг}$ характерны для старичных отложений (0,13-14,94%).

В русловых отложениях р. Пахры (приток р. Москвы) в зависимости от их литологического состава концентрация $C_{орг}$ изменялась в пределах 0,5-1,2% (нижние значения были характерны для песков, верхние - для илистых отложений).

В составе аминокислот, присутствующих в органическом веществе аллювия крупнейших рек, преобладают нейтральные аминокислоты, а среди индивидуальных аминокислот - аспарагиновая и глутаминовая кислоты; обнаружены лигнин (от сотых долей до нескольких процентов) и продукты его деструкции (преобладают ваниловый альдегид, параоксиацетофенон и параоксибензальдегид), кетоны, органические кислоты, а также гуминовые кислоты и битумоиды [6, 83]. Суммарное содержание идентифицированных фенолов в отложениях устья Сев. Двины варьиро-

валось от 5,3 до 35,2 мг/кг воздушно-сухого образца, или 0,06-2,88% от $C_{орг}$ [6].

Различные фации аллювия характеризуются своеобразием инженерно-геологических свойств. В частности, в песчаных отложениях ряда фаций «прирусловой вал - периферийно-русловая - пляжевая - русловая - базальная» с ростом среднего диаметра, неоднородности и уменьшением глинистых частиц снижаются показатели сжимаемости, объемной массы, углов естественного откоса, возрастает средняя плотность скелета в предельных рыхлом и плотном состояниях; в ряду отложений «болото – старица – пойма» снижаются пластичность, молекулярная влагоемкость, гигроскопическая и естественная влажность и сжимаемость и возрастает относительная и средняя плотность, объемная масса скелета, углов внутреннего трения и сцепление грунтов, что обусловлено увеличением доли монтмориллонита, величины рН и уменьшением Eh; в ряду «супесь - суглинок - глина» увеличиваются пластичность, плотность, гигроскопическая влажность и снижается величина угла внутреннего трения и модуля отложений, что связано с ростом содержания в них глинистых минералов, органического вещества и карбонатов; вниз по долине (от истоков к устью) в связи с дифференциацией состава аллювия снижаются величины объемной массы скелета, модуля осадки песков, увеличиваются углы естественного откоса и внутреннего трения, растет водопроницаемость песков [39, 40].

В большинстве случаев содержания химических элементов в русловом аллювии существенно не превышают их средние концентрации в осадочных породах, почвах, речных взвесах и в отложениях конечных водоемов стока (находятся в пределах кларка), что, однако, не всегда выдерживается для некоторых химических элементов и(или) нарушается в пределах конкретных речных бассейнов и фациальных обстановок, а также зависит от литологического состава речных отложений. Повышенные концентрации многих элементов характерны для отложений стариц, затонов и илистых разностей аллювия (табл. 60-62). Естественно, что уровни большинства элементов во взвеси выше, чем в донных отложениях.

Речные отложения, особенно русловые, закономерно характеризуются незначительными концентрациями макрокомпонентов в водных вытяжках (табл. 63). Обычно состав поглощенного комплекса находится в прямой зависимости от литологического типа отложений. В частности, во фракции менее 0,001 мм по сравнению с отложениями, из которых она выделена, в поглощенном комплексе отмечено увеличение содержания кальция в 3 и магния в 2 раза, щелочи имеют близкие значения [58].

Химические элементы присутствуют в донных отложениях рек в разных формах - сорбционных, органоминеральных, входят в состав кристаллических решеток минералов и т.д. Они по-разному накапливаются в

различных фракциях аллювия, имея тенденцию к более резкому концентрированию в тонких разновидностях последнего (табл. 64). Так, начиная с частиц размером менее 0,075 мм и особенно менее 0,01 мм (т. е. во фракции физической глины) наблюдается заметное увеличение концентраций микроэлементов, что может быть связано как с увеличением степени концентрирования рудных минералов, так и с сорбционными процессами. Аллювиальные воды также характеризуются присутствием заметных количеств химических элементов и их соединений. Существующие в реках процессы способны приводить к активному поступлению многих элементов из отложений и иловых вод в водную толщу.

Таблица 60. Сравнительная характеристика фоновых содержаний химических элементов в донных отложениях, бассейн р. Нуры

Элемент	I		II		Фон в почвах	А	Б
	мг/кг	V, %	мг/кг	V, %			
Литий	26	36	34	23	31	56	32
Бериллий	2	56	2	67	1,5	-	3,8
Бор	11	19	15	40	9	-	12
Фосфор	800	90	1000	76	600	670	930
Скандий	1,1	42	2,7	49	3,5	10	10
Титан	1110	21	1750	19	3500	3800	4500
Ванадий	168	30	175	21	170	105	90
Хром	51	82	65	47	60	72	83
Марганец	221	37	275	39	840	770	1000
Кобальт	9,1	36	16	18	16	14	18
Никель	25	90	27	46	31	52	58
Медь	73	59	80	25	37	33	47
Цинк	38	34	70	33	85	95	83
Галлий	13,4	23	12	26	12	18	19
Германий	1,2	44	1,5	57	1	-	1,4
Мышьяк	3	65	7	68	8	7,7	1,7
Стронций	42	26	55	33	60	320	340
Иттрий	3,5	26	4,6	24	11	-	29
Цирконий	30	85	31	78	100	-	170
Ниобий	3,5	27	3,3	31	5	13	20
Молибден	1,6	49	2,2	89	1,5	2	1,1
Серебро	0,05	27	0,078	31	0,05	0,057	0,07
Олово	3,7	26	2,9	19	3	4,6	2,5
Сурьма	1,3	77	1,5	67	1,5	1,2	0,5
Барий	270	36	160	31	195	460	650
Иттербий	1	75	1	85	1	-	0,33
Вольфрам	1,5	85	2,1	75	1,5	1,7	1,3
Ртуть	0,044	88	0,14	75	0,02	-	-
Свинец	32	11	35	23	40	19	16
Висмут	0,4	90	0,6	67	0,5	0,4	0,009
Кол-во проб	59		25		-	-	-

Примечание. I - типичный русловой аллювий, представленный песчаными отложениями (верховья Нуры); II - фоновые русловые илы (верховья Нуры); V - коэффициент вариации, %; IV - отложения, слагающие борта русла (верховья Нуры); А - среднее содержание в осадочных породах [161]; Б - кларк литосферы [21].

Таблица 61. Сравнительная характеристика фоновых содержаний химических элементов в донных отложениях р. Пахра и р. Москвы

Элемент	р. Пахра		р. Москва, мг/кг	Фон в поч- вах, мг/кг	А мг/кг	Б мг/кг
	мг/кг	V, %				
Литий	23	50	28	12,1	56	32
Бериллий	1	47	-	0,3	-	3,8
Бор	48	41	30	38	-	12
Скандий	2,6	38	1,8	2,8	10	10
Титан	2960	29	1900	5990	3800	4500
Ванадий	75	73	35	82	105	90
Хром	51	40	30	45	72	83
Марганец	635	48	470	1250	770	1000
Кобальт	4,9	49	3,5	7,2	14	18
Никель	18	54	16	20	52	58
Медь	30	39	23	26	33	47
Цинк	123	62	75	52	95	83
Галлий	9	42	6	12	18	19
Стронций	31	85	35	27	320	340
Иттрий	18	45	11	18	-	29
Цирконий	290	30	240	420	-	170
Ниобий	10	35	7	15	13	20
Молибден	0,83	73	0,65	0,81	2	1,1
Серебро	0,02	88	0,03	0,057	0,057	0,07
Олово	4,7	63	3	5	4,6	2,5
Сурьма	3	90	-	-	1,2	0,5
Барий	93	59	110	227	460	650
Иттербий	2,3	34	1,5	2,1	-	0,33
Вольфрам	1,8	90	-	-	1,7	1,3
Ртуть	0,01	85	-	-	-	-
Свинец	29	44	22	25	19	16
Висмут	0,25	95	-	-	0,4	0,009
Кол-во проб	85		50	-	-	-

Примечание. Пахра, верховья, русловый аллювий; Москва, верховья, русловой аллювий; V, % - коэффициент вариации, %; почвы - верхний горизонт, бассейн р. Пахра, данные ИМ-ГРЭ (Е.П. Сорокиной); А - среднее содержание в осадочных породах [161]; Б - кларк литосферы [21].

Таблица 62. Уровни химических элементов в отложениях р. Ред (Англия) в зависимости от состава горных пород, слагающих водосбор, мг/кг [157]

Элемент	Минерализованные породы	Неминерализованные породы
Марганец	1020	657
Медь	706	563
Цинк	1590	358
Свинец	775	133
Кадмий	6	4
Железо	57000	39000

Таблица 63. Состав водных вытяжек из аллювиальных отложений, %

Компонент	Арктические и субарктические современные илистые речные пески (Данилов, 1978)	Современные отложения [58]:		Верхнечетвертичные речные отложения бассейна, все фракции, р. Припять [58]
		Днепр	Сож	
Плюнный остаток	0,030 – 0,069	-	-	0,020 - 0,096
HCO ₃ ⁻	0,005 – 0,009	0,04-0,14	0,03-0,14	0,005 – 0,077
Cl ⁻	0,006 – 0,032	0,00-0,06	0,00-0,02	0,005 – 0,008
SO ₄ ²⁻	0,020 – 0,126	0,00-0,10	0,00-0,06	0,004 – 0,015
Ca ²⁺	0,002 – 0,010	0,00-0,15	0,00-0,04	0,004 – 0,024
Mg ²⁺	0,001	0,00-0,07	0,01-0,15	0,001 – 0,003
K ⁺ + Na ⁺	0,001 – 0,009	0,02-0,10	0,01-0,03	0,002 – 0,015

Таблица 64. Микроэлементы в различных фракциях современных речных отложений бассейна р. Припяти, мг/кг [58]

Фракция, мм	Mn	Cr	V	Cu	Ba	Ti
2-1,5	88	-	6	3	290	290
1,5-1,0	124	-	6	4	160	240
1,0-0,5	111	-	-	7	450	180
0,5-0,25	123	10	12	22	510	210
0,25-0,1	122	27	12	31	520	380
0,1-0,075	154	32	14	15	450	1250
0,075-0,01	820	215	77	25	1150	4720
0,01-0,005	1130	323	86	80	3520	2890
0,005-0,001	880	330	110	82	3710	3260
< 0,001	933	230	65	76	1060	2860

Таким образом, наблюдается довольно ограниченный набор петрографических типов осадков равнинных рек, представленных в основном песчаными и песчано-алевритовыми разностями, для которых характерно преобладание мономинеральных кварцевых песков с высокой степенью дифференциации материала, повышенными содержаниями кремния и пониженными алюминия, железа и многих других элементов. Уровни содержания многих химических элементов в современном русловом аллювии находятся в пределах глобальных параметров их распределения в осадочных породах и в земной коре.

Русловые илы

Наряду с хорошо промытыми песками в состав руслового аллювия равнинных рек входят также и существенно иные литогенетические типы. Так, на спаде воды в пределах русловой отмели скорости течения

резко уменьшаются, особенно в ее нижней по течению части, что создает условия, благоприятные для осаждения части взвешенного в воде тонкого алевритового и глинистого материала. Аналогичные гидродинамические условия создаются в заводях, затоках, рукавах; заилении идет также в глубоких плесах. Это приводит к формированию в руслах илистых отложений, или речных илов [55, 65, 66, 100, 123, 138]. Особенно интенсивно илы аккумулируются в летние меженные периоды, но могут активно размываться в половодья и паводки, очень часто являясь, таким образом, эфемерными образованиями. Ю.А. Билибин [10] наблюдал илы в старых, полуотмерших протоках полугорных рек, а также так называемые береговые илы, аккумулирующиеся в прибрежных зарослях макрофитов.

Процессы образования современных русловых илов, их литолого-геохимический состав изучены недостаточно полно. Сущность илообразования, по А.И. Перельману [97], заключается в разложении органических веществ и в окислительно-восстановительных реакциях. А.И. Перельман выделяет три типа илов. Окислительные илы образуются там (в том числе, в реках), где господствуют кислородные воды и создаются условия для перемешивания вод. Глеевые илы характерны для озер, расположенных во влажном климате, где продуцируется много органики, а сульфатов в водах мало. Здесь развивается восстановительная обстановка без сероводорода (глеевая), Fe^{3+} , Mn^{4+} восстанавливаются, илы приобретают сизую, зеленоватую, серую, охристо-сизую окраску. В глеевых илах не хватает кислорода для окисления органических веществ, их разложение замедляется (типичный пример - сапрпель). Сероводородные (сульфидные) илы широко распространены в морях и океанах, озерах степей и пустынь, где преобладают сульфатные воды, развивается десульфуризация, продуцируется сероводород, образуются сульфиды железа. Илы имеют черный, серый и синеватый цвет.

В гранулометрическом отношении речные илы обычно представляют собой тонкий материал, основную массу которого составляют частицы размером 0,01-0,05 (40-50%) и 0,001-0,01 мм (до 10-20%) [54, 66]. Остальное приходится на примесь еще более тонких частиц (до 10-20%) и песчаного материала (2-10%) (табл. 65). Важной особенностью речных илов являются высокие содержания органических веществ ($C_{орг}$ может достигать 9-30%) и глинистых минералов.

Формирование илистых отложений активно происходит также на пойме, особенно после весеннего половодья (табл. 66). В данном случае в прирусловой области поймы р. Жиздры (в 200 м от русла) отложились слабо гумусированные (гумус по Тюрину = 1,2%) легкосуглинистые наилки мощностью до 2-4 см, доля физической глины в которых достигает почти 25%. В центральной и притеррасной областях поймы произошло аккумулятивное более гумусных (гумуса 4,6%) и тяжелосуглинистых

наносов мощностью 0,5-1,5 см с содержанием физической глины более 67%.

Таблица 65. Гранулометрический состав современных русловых илов р. Оки, % [66]

Глубина реки, м	Фракция, мм					
	3-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,10
5,5	0,15	0,24	0,60	4,22	29,35	65,44
4,5	-	-	-	0,48	5,67	93,85
2,8	3,67	0,27	0,41	2,16	18,07	75,42
1,7	-	0,13	0,50	3,54	18,24	77,59
10,0	-	-	0,14	4,30	15,25	80,31

Таблица 66. Гранулометрический состав наилок поймы р. Жиздры, % [57]

Место отбора проб, пойма	Размер фракций, мм						
	1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001	<0,01
Прирусловая	0,2	10,9	61,0	3,6	5,1	16,1	24,8
Притеррасная	0,1	2,8	24,1	18,2	15,8	33,9	67,9

В минеральном составе илов преобладают кварц, полевые шпаты, накапливаются слюды, а при наличии карбонатных пород - карбонатные минералы. От типичного руслового аллювия (песчаные разности) илы отличаются повышенными содержаниями органических веществ (велика роль фульвокислот), глинозема, гидроксидов Fe и Mn, серы, фосфора, иногда калия (табл. 67), некоторых микроэлементов (см. табл. 60). Значения многих петрохимических модулей свидетельствуют о близости состава илов составу почв водосборного бассейна (табл. 68).

Таблица 67. Химический состав руслового аллювия и почв, % (бассейн р. Нуры)

Компонент	Русловые пески	Русловые илы	Почвы водосбора
SiO ₂	79,90	60,10	56,73
TiO ₂	0,24	0,52	0,66
Al ₂ O ₃	6,66	11,90	13,00
Fe ₂ O ₃	1,28	2,37	4,06
FeO	1,41	2,44	1,80
MnO	0,06	0,09	0,16
CaO	1,35	4,80	3,65
MgO	0,62	1,60	2,30
Na ₂ O	2,94	2,10	1,0
K ₂ O	3,36	2,60	2,35
P ₂ O ₅	0,07	0,13	0,11
H ₂ O	0,26	1,38	3,58
S	<0,10	0,11	< 0,10
ППП	1,73	8,90	11,50
CO ₂	<0,22	2,80	1,72

Таблица 68. Петрохимические модули руслового аллювия и почв (бассейн Нуры)*

Модуль	Русловые пески	Русловые илы	Почвы
Гидролизатный, $Al_2O_3+TiO_2+Fe_2O_3+FeO/SiO_2$	0,07	0,17	0,20
Алюмокремниевый, Al_2O_3/SiO_2	0,05	0,12	0,13
Титановый, TiO_2/Al_2O_3	0,05	0,04	0,07
Калиевый, K_2O/Al_2O_3	1,3	0,6	0,5
Плагиоклазовый, Na_2O+CaO/K_2O	0,5	2,1	2,6
Зрелости, SiO_2/Al_2O_3	20	9	8
Степени дифференциации, SiO_2/Na_2O+K_2O	9	9	11
Показатель зрелости, $Al_2O_3/SiO_2+MgO+K_2O+Na_2O$	0,04	0,10	0,12
Закисный, FeO/Fe_2O_3	2,5	2,3	0,98
Окисления, Fe_2O_3/FeO	0,4	0,4	1,02
SiO_2/R_2O_3	18	8	6
ППП/ SiO_2	0,001	0,008	0,012
Силификации, $SiO_2/R_2O_3+RO+R_2O$	4,6	2,4	2,4
Ферритизации, Fe_2O_3+FeO/SiO_2	0,02	0,05	0,05

* Рассчитано по данным табл. 67.

В настоящее время процессы илообразования интенсивно протекают в реках промышленно-урбанизированных районов. Такие территории характеризуются увеличением темпов и объемов поступающего в водотоки техногенного осадочного материала, отличающегося специфическим вещественным составом. Это обуславливает формирование в руслах и долинах рек особого типа речных отложений - техногенных илов, которые своими литолого-геохимическими свойствами отличаются от естественного (фонового) руслового аллювия и выстилают русла рек на значительном расстоянии [145, 146, 149, 151-153] (рис. 29). Морфологический облик, гранулометрические характеристики, петрохимический состав и геохимические особенности техногенных илов свидетельствуют о том, что материальной основой их в значительной степени являются техногенный осадочный материал, поступающий в реки со сточными водами. В качестве своеобразной геохимической модели техногенных илов выступают осадки сточных вод, образующиеся на городских очистных сооружениях в ходе очистки сточных вод.

Важнейшими свойствами техногенных илов, обладающих в местах наибольшего накопления определенной стратификацией, обусловленной условиями их накопления и вторичным преобразованием, являются специфический темно-серый или черный цвет, химический запах, преимущественно вязкотекучая или мягкопластичная консистенция, высокие содержания алевритовых и глинистых частиц, органических веществ, глинозема, закиси железа, оксида кальция, серы, тяжелых металлов и ряда других химических элементов, повышенная карбонатность (табл. 69-71). В целом указанные свойства относительно стабильны как в толще техногенных илов, мощность которых изменяется от 0,2-0,5 до 2-3,5 м, так и на значительной протяженности (многие десятки километров) рус-

ла. В большинстве случаев максимальные концентрации многих тяжелых металлов и наиболее высокие значения суммарного показателя загрязнения приурочены к верхним горизонтам илов. Обычно в общей схеме строения прослеженного в изученных реках техногенного потока, отвечающего зоне техногенного осадконакопления, выделяется несколько участков русла, отличающихся общим уровнем техногенного загрязнения, степенью его санитарно-токсикологической вредности, особенностями пространственного распределения химических элементов.

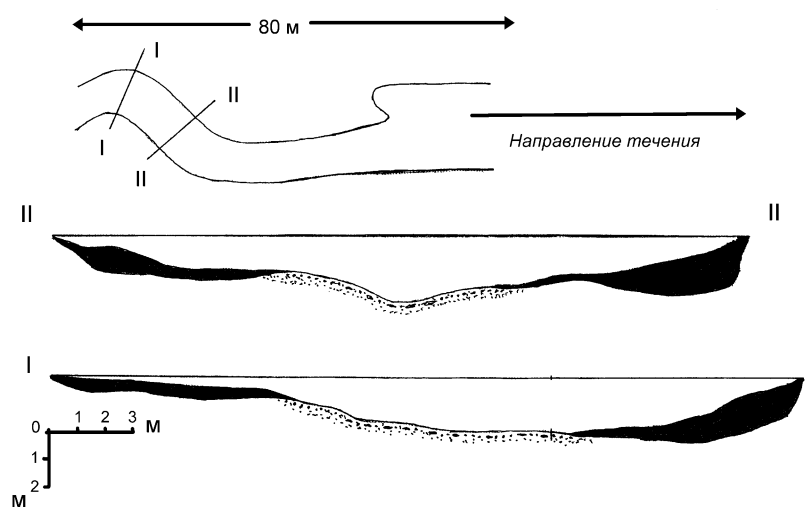


Рис. 29. Поперечный профиль через русло Инсара ниже г. Саранска

Сплошным темным цветом показано расположение техногенных илов; прочее - песчано-гравийные отложения с включениями частиц техногенного ила

Таблица 69. Гранулометрические характеристики фонового аллювия (ФА) и техногенных илов (I-X), р. Инсар

Участок опробования р. Инсар	Медианный диаметр, мм	Доля (%) физической глины, (<0,01 мм)	Коэффициент сортированности	Коэффициент дисперсности
ФА (верховья)	0,220	1,8	2	0,04
I (устье Лепелейки)	0,020	24,4	35	0,38
II (центр Саранска)	0,015	22,0	11	0,48
III (ниже руч. Никитинского)	0,075	11,9	17	0,19
IV (выше ГОС)	0,049	23,2	17	0,35
V (0,2 км ниже ГОС)	0,053	18,3	20	0,33
VI (4,5 км ниже ГОС)	0,015	20,3	4	0,43
X (40 км ниже ГОС)	0,035	14,7	8	0,25

Таблица 70. Химический состав фоновых почв (ФП), фонового руслового аллювия (ФА), осадков сточных вод (ОСВ) и взвеси сточных вод (ВСВ) г. Саранска, техногенных илов из р. Инсар, %

Ком- по- нент	ФП	ФА	ОСВ)	ВСВ	Техногенные илы, р. Инсар ниже г. Саранска					
	<i>Слой опробования, см</i>									
	0-10	0-30	30-80	-	0-20	20-60	60-120	120-180	180-240	240-300
SiO ₂	73,69	81,63	23,87	28,3	44,50	62,32	58,42	57,64	59,24	64,35
TiO ₂	0,54	0,33	0,25	0,40	0,58	0,64	0,64	0,60	0,61	0,59
Al ₂ O ₃	6,41	5,22	4,70	5,50	10,05	10,52	10,98	11,00	10,64	9,92
Fe ₂ O ₃	2,59	4,03	1,04	4,16	3,22	4,24	3,73	3,93	4,72	5,17
FeO	0,47	0,57	3,00	3,20	2,65	1,36	2,66	3,74	2,30	1,41
MnO	0,20	0,078	0,04	-	0,048	0,075	0,079	0,076	0,070	0,057
CaO	0,47	0,78	8,00	8,14	4,10	2,20	2,20	1,80	1,72	1,72
MgO	0,70	0,37	1,40	2,32	0,92	1,16	1,36	1,05	1,05	0,84
Na ₂ O	0,55	0,56	0,58	0,88	0,90	0,98	0,92	0,95	1,00	1,00
K ₂ O	1,48	1,05	0,84	1,15	1,87	1,89	1,89	2,10	2,10	1,89
P ₂ O ₅	0,14	0,19	3,00	-	0,99	0,49	0,62	0,38	0,33	0,25
H ₂ O	4,98	1,37	4,81	-	4,50	2,50	2,58	1,82	2,44	2,18
ППП	7,20	3,66	46,08	41	25,79	10,48	12,23	13,37	12,01	9,88
S _{общая}	< 0,10	< 0,10	1,79	-	0,11	0,17	0,32	0,16	0,37	0,58
CO ₂	0,22	0,66	2,75	-	1,29	1,32	1,32	0,77	0,66	0,66

Примечание. ППП - потери при прокаливании.

Таблица 71. Геохимические ассоциации в техногенных илах р. Инсар (I-XII), осадках сточных вод (ОСВ) и взвеси сточных вод (ВСВ) г. Саранска

Участок	Химические элементы и порядок значений их K_C относительно уровней в фоновом аллювии					Z_C
	> 100	100-30	30-10	10-3	3-1,5	
Выше Саранска	-	-	-	Bi	Pb-Zn-Sn-P-Cu-Cr-W-Ga-Hg	12
I (устье Лепелейки)	Sn	Bi	Cu-Ni	Zn-Ag-Cr-Pb-W	Tl-Sr-Hg-Ga-P	275
II (центр Саранска)	-	-	Hg	Bi-Pb-Zn-Sn-Sr-Ag-Cu	W-B-Ga	56
III (ниже руч. Никитинского)	Cd-Hg-Mo	Zn	Sn-Cu-W	Ag-Ni-Pb-Cr-Sr	F-Tl-V-Ga	810
IV (выше ГОС)	Cd	Hg-Sn	Cu-Mo	W-Ag-Zn-Bi-Ni	Cr-Pb-Sr-P-B-Ga-Tl-F	210
ОСВ	Cd-Sn-Hg	Ag-Zn-Bi-W- Cu-Cr	Mo-Ni-Sb	F-Be	Sr-Tl-U	1140
ВСВ	Cd-Mo-Sn	Ag-Zn-Hg-Bi	Cu-W	Ni-Cr-P-Pb-Sb	As-Sr-Be-F	1020
V (0,2 км ниже ГОС)	Sn	Cd	Hg-Mo-Bi	Cu-Ag-Zn-Cr-Pb-W	Li-Tl-Ni-P-Sr-Co-Be	358
VI (4,5 км ниже ГОС)	Sn	Cd-Hg	Mo-Be-Cu	Zn-W-Ag-Pb-Ni-Cr-Bi	Sr-Tl-B-F-Li-Co	318
X (40 км ниже ГОС)	-	-	-	Sn-Cd-Tl-Cu-Zn	Ag-Hg-Mo-Pb-Sr-Cr-Ga-Bi	23
Устье Инсара	-	-	-	Sn-Mo-Cu	W-Sr-Sn-Tl-Cr-Cd-Hg	19

Примечание. K_C - коэффициент концентрации; Z_C - суммарный показатель загрязнения; ГОС – очистные сооружения г. Саранска.

Как правило, непосредственно ниже города река, принимающая сточные воды, характеризуется особенно интенсивным накоплением техногенных илов и соответственно высоким уровнем техногенного загрязнения и его опасной степенью санитарно-токсикологической вредности. Техногенные илы прослеживаются в руслах рек на многие десятки километров (до 100-150 км) ниже города, характеризуясь в общей своей массе высокими значениями суммарного показателя загрязнения (рис. 30).

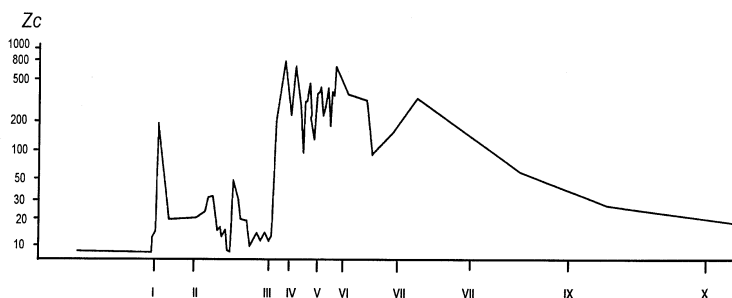


Рис. 30. Распределение значений суммарного показателя загрязнения Z_c в отложениях Инсара в зоне влияния г. Саранска, слой 20-60 см (I-X – опорные участки отбора проб; створ III – ниже руч. Никитинского, дренирующего промзону, створ V – ниже городских очистных сооружений)

Формирование техногенных илов в руслах городских рек обусловлено как гидравлическим осаждением поступающих взвешенных веществ, так и процессами коагуляции тонкой взвеси и коллоидов и их последующего выпадения в осадок. Определенное значение имеет осаждение аморфных веществ, образующихся в результате сорбционных процессов и флокуляции. Интенсивное накопление техногенных илов определяется благоприятными геоморфологическими условиями, такими, как общее расширение речной долины, формирование широкопойменного русла, наличие многочисленных меандр, выполаживание продольного профиля русла, а также развитием зарослей макрофитов и невысокой скоростью течения в меженные периоды. Определенную роль играют гидротехнические сооружения (например, плотины, мостовые переходы и т. п.).

С геохимической точки зрения техногенные илы представляют собой резко неуравновешенную, неустойчивую физико-химическую систему, характеризующуюся повышенным содержанием легкоподвижных и органоминеральных форм металлов и способную к активным диагенетическим изменениям слагающего их вещества. В результате вторичного перераспределения речным потоком, процессов разубоживания и физико-химического преобразования илы постепенно приобретают литолого-

геохимические параметры, близкие к характеристикам природных речных отложений. Можно считать, что техногенные илы, формирующиеся в руслах рек промышленно-урбанизированных районов, представляют собой специфическую техногенную фацию руслового аллювия и являются новым типом современных осадочных образований, совокупность процессов образования которых может быть названа техногенным аллювиальным седиментогенезом.

Техногенные илы, отличаясь высокими содержаниями илисто-глинистых частиц и техногенной органики, обладают повышенной устойчивостью к размыву, формируют различные формы руслового рельефа и тем самым влияют на ход руслового процесса и динамику речного русла. Русло реки, сложенное на значительной части илами, обладает увеличенной способностью к транспорту поступающих со стоками взвешенных и коллоидных частиц и их последующей аккумуляции на значительном удалении от источников загрязнения. Наиболее активно переотложение и дальний перенос илистого материала происходят в паводки, половодья, при аварийных сбросах сточных вод. Концентрируя органические и неорганические загрязнители, техногенные илы являются источником вторичного загрязнения водной фазы и способны оказывать токсическое действие на гидробионты. Нормальное функционирование речной системы и использование ее ресурсов в практических целях возможно лишь при изъятии илов, объем которых в русле, например, даже такой небольшой реки, как Инсар (Мордовия), достигает 1 млн. м³.

Безусловно, оценка экологического состояния речных систем и изучение русловых процессов в промышленно-урбанизированных районах в настоящее время должны проводиться с учетом масштабов распространения техногенных речных илов, их вещественного состава и геохимических свойств.

Заключение

Русловой аллювий равнинных рек представляет собой гетерогенное осадочное образование, алло- и автохтонные компоненты которого отражают различные физические, химические и биохимические процессы, приводящие к его образованию. Геологическое строение и растительно-почвенный покров водосборов создают общий фон, в существенной мере предопределяющий литологические, минералогические и геохимические характеристики современных русловых отложений. В природных условиях их образование и морфологическое проявление обусловлены направленностью и интенсивностью эрозионно-аккумулятивных процессов, протекающих в пределах водосборного бассейна и непосредственно в руслах рек. Конечный результат сопряженного действия указанных процессов, проявляющийся в накоплении аллювиальных отложений, образующих в реках закономерно построенный и достаточно сложный морфологический комплекс, существенно зависит от гидрологического режима водотоков, который, в свою очередь, определяется взаимодействием факторов, прямо или косвенно влияющих на формирование речного стока. Для геохимического состава руслового аллювия и его преобразования большое значение имеют механическая дифференциация и фракционирование твердых фаз, физико-химические параметры среды аллювиального осадконакопления и процессы, определяющие поведение химических элементов в водной толще и донных отложениях, а также сезонные изменения водного режима реки, гидравлика потока и степень насыщенности его осадочным материалом.

В ходе аллювиального седиментогенеза в зависимости от направленности движения земной коры, рельефа, климата и режима водных потоков обычно меняется лишь динамика процесса аккумуляции и тем самым степень развития и особенности строения аллювиальной толщи. Наиболее хорошо дифференцированным и типично построенным является аллювий крупных равнинных рек, принадлежащих гумидным зонам. Среди литологических типов русловых отложений, как правило, доминируют мелкозернистые пески. На прирусловых отмелях часто формируется тонкий слой илистых (супесчано-илистых) отложений (наилков). Собственно илы имеют подчиненное значение и встречаются преимущественно в затонах, плесах, старицах. В настоящее время процессы илообразования особенно активно протекают в реках промышленно-урбанизированных районов. Такие территории характеризуются увеличением темпов и объемов поступающего в водотоки техногенного осадочного материала, отличающегося специфическим вещественным составом. Это приводит к формированию в руслах и долинах рек особой и часто широко развитой русловой фации современных аллювиальных отложе-

ний - техногенных илов, которые своими литологическими и геохимическими свойствами резко отличаются от естественного (фонового) руслового аллювия.

В современных русловых отложениях равнинных рек установлены около 80 терригенных минералов, многие из которых, однако в большинстве случаев в составе аллювия резко преобладает кварц (до 85-95%), присутствуют полевые шпаты (5-10%), обломки пород (до 2%), среди минералов легкой фракции в значимых количествах чаще всего встречаются также ортоклаз, микроклин, плагиоклаз, глауконит; в тяжелой фракции доминирует ассоциация ильменит-гранат-роговая обманка-эпидот. В тонких фракциях аллювия встречаются глинистые минералы, а в особых условиях осадконакопления в аллювии обнаружены разнообразные диагенетические минеральные образования.

С геохимической точки зрения современные русловые отложения представляют собой относительно сложные физико-химические системы, характеризующиеся довольно широким диапазоном окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий, основным контролирующим фактором которых является состав отложений. Химический состав последних, обладая в каждом конкретном случае некоторым своеобразием, тем не менее практически всегда отличается высокими содержаниями кремнезема (до 70-80% и более) и глинозема (около 5-6%), что является следствием минералогического состава. Содержания химических элементов в русловом аллювии обычно близки их средним концентрациям в осадочных породах, почвах и в отложениях конечных водоемов стока, что, однако, не всегда выдерживается для некоторых химических элементов и(или) нарушается в пределах отдельных речных бассейнов и фациальных обстановок, а также зависит от гидродинамических и геохимических условий осадконакопления. Химические элементы присутствуют в донных отложениях рек в разных формах - сорбционных, органоминеральных, связанных с гидроксидами железа, марганца, алюминия, входят в состав кристаллических решеток минералов (преобладают в фоновом аллювии) и т.д. Повышенные концентрации многих элементов характерны для илистых фаций аллювия.

Русловые отложения являются средой обитания гидробионтов, играют важную роль в формировании химического состава речных вод, обуславливают многие особенности экологии водных систем, особенно в промышленно-урбанизированных районах. Это, в сущности, и определяет необходимость дальнейших, прежде всего, геохимических исследований современного руслового аллювия в реках природных и хозяйственно освоенных территорий.

Литература

1. *Алекин О.А.* Гидрохимия. - Л.: Гидрометеиздат, 1970. - 444 с.
2. *Алекин О.А.* Химический состав растворенных веществ речного стока // Химия океана. Т. 1. Химия вод океана. - М.: Наука, 1979, с. 51-55.
3. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. - М.: Изд-во МГУ, 1998. - 202 с.
4. *Амфлетт Ч.* Неорганические иониты: Пер. с англ. - М.: Мир, 1966. - 188 с.
5. *Аникиев В.В.* Короткопериодные геохимические процессы и загрязнение океана. - М.: Наука, 1987. - 193 с.
6. *Артемов В.Е.* Геохимия органического вещества в системе река - море. - М.: Наука, 1993. - 204 с.
7. *Афремов Д.Н.* Изменчивость состава и свойств аллювия как показатель условий осадконакопления // ДАН СССР, 1976, 230, № 1, с. 178-181.
8. *Баас Беккинг Л.Г.М., Каплан И.Р., Мур Д.* Пределы колебаний рН и окислительно-восстановительных потенциалов природных сред // Геохимия литогенеза: Пер. с англ. - М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963, с. 11-84.
9. *Балоде М.Я., Гайле М.Я., Зандмане А.К. и др.* Гидробиологический режим малых рек в условиях антропогенного воздействия. - Рига: Зинатне, 1981. - 166 с.
10. *Билибин Ю.А.* Основы геологии россыпей. - М.: Изд-во АН СССР, 1956. - 463 с.
11. *Боголюбов А.Н.* Потоки рассеяния. Опробование аллювиальных отложений // Использование ореолов рассеяния урана и элементов-спутников при поисках и разведке гидротермальных урановых месторождений. - М.: Недра, 1964, с. 65-77, 104-112.
12. *Болдырев А.И.* Физическая и коллоидная химия. - М.: Высш. шк., 1974. - 504 с.
13. *Боровков В.С.* Руслые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - 286 с.
14. *Браунлоу А.Х.* Геохимия: Пер. с англ. - М.: Недра, 1984. - 463 с.
15. *Валяшко М.Г., Поливанова А.И., Жеребцова И.К. и др.* Геохимия и генезис рассолов Иркутского амфитеатра. - М.: Наука, 1965. - 159 с.
16. *Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Кощеева И.Я. и др.* Изучение химических форм элементов в поверхностных водах // ЖАХ, 1983, 38, с. 1590-1600.
17. *Варшал Г.М., Кощеева И.Я., Сироткина И.С. и др.* Изучение органических веществ поверхностных вод и их взаимодействия с ионами металлов // Геохимия, 1979, № 4, с. 598-602.
18. *Варшал Г.М., Кощеева И.Я., Сироткина И.С. и др.* Изучение органических веществ поверхностных вод и их взаимодействия с ионами металлов в связи с миграцией загрязняющих веществ в объектах внешней среды // Органическая геохимия и поисковая геохимия. - М.: Наука, 1982, с. 202-212.
19. *Великанов М.А.* Руслый процесс. - М.: Физматгиз, 1958. - 369 с.
20. *Вернадский В.И.* Избранные сочинения. Т. 4, кн. 2. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 651 с.
21. *Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия, 1962, № 7, с. 595-571.
22. *Винников С.Д., Проскуряков Б.В.* Гидрофизика. - Л.: Гидрометеиздат, 1988. - 248 с.

23. *Волков И.И.* Химические элементы в речном стоке и формы их поступления в море (на примере рек Черноморского бассейна) // Проблемы литологии и геохимии осадочных пород и руд. - М.: Наука, 1975, с. 85-113.
24. *Воскресенский С.С.* Динамическая геоморфология: формирование склонов. - М.: Изд-во МГУ, 1971. - 229 с.
25. Географический энциклопедический словарь. Понятия и термины. - М.: Сов. энциклопедия, 1988. - 432 с.
26. Геологический словарь. Т. 1. - М.: Госгеолтехиздат, 1955. - 402 с.
27. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. - М.: Высш. шк., 1988. - 328 с.
28. *Гончаров В.Н.* Равномерный турбулентный поток. - Л.: Госэнергоиздат, 1951. - 145 с.
29. *Горбунов Н.И.* Высокодисперсные минералы и методы их изучения. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 302 с.
30. *Гордеев В.В.* Речной сток в океан и черты его геохимии. - М.: Наука, 1983. - 160 с.
31. *Гордеев В.В., Лисицын А.П.* Средний химический состав взвесей рек Мира и питание океанов речным осадочным материалом // ДАН СССР, 1978, 238, № 1, с. 225-228.
32. Горная энциклопедия. Т. 1. - М.: Сов. энциклопедия, 1984. - 560 с.
33. Грани гидрологии : Пер. с англ. - Л.: Гидрометеоздат, 1980. - 447 с.
34. *Гринвальд Д.И.* Турбулентность русловых потоков. - Л.: Гидрометеоздат, 1974. - 166 с.
35. *Дедков А.П., Мозжерин В.И.* Эрозия и сток наносов на Земле. - Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1984. - 261 с.
36. *Демина Л.Л.* Формы миграции тяжелых металлов в океане. - М.: Наука, 1982. - 120 с.
37. *Дривер Дж.* Геохимия природных вод: Пер. с англ. - М.: Мир, 1985. - 440 с.
38. *Еленевский Р.А.* Вопросы изучения и освоения пойм. - М.: ВАСХНИЛ, 1936. - 100 с.
39. *Еськов Б.Г.* Инженерно-геологические свойства аллювия Среднего Днепра. - Киев: Наук. Думка, 1977. - 195 с.
40. *Еськов Б.Г.* Сравнительная характеристика инженерно-геологических свойств аллювия и близких ему генетических типов отложений // Инж. геология, 1979, № 3, с. 104-114.
41. *Ефремова С.В., Стафеев К.Г.* Петрохимические методы исследования горных пород. - М.: Недра, 1985. - 511 с.
42. *Заславский М.Н.* Эрозия почв. - М.: Мысль, 1978. - 245 с.
43. *Заславский М.Н.* Эрозиоведение. - М.: Мысль, 1984. - 320 с.
44. *Зверев В.П.* Роль подземных вод в миграции химических элементов. - М.: Недра, 1982. - 186 с.
45. *Зернов С.А.* Общая гидробиология. - М.-Л.: Биомедгиз, 1934. - 503 с.
46. *Иванова А.М., Коновалов Г.С.* О механическом и минералогическом составе взвешенных веществ некоторых рек Советского Союза // Гидрохим. мат-лы, 1971, т. 55, с. 79-89.
47. *Казанский Ю.П.* Седиментология. - Новосибирск: Наука, 1976. - 271 с.
48. *Караушев А.В.* Теория и методы расчета речных наносов. - Л.: Гидрометеоздат, 1977. - 272 с.

49. Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. - Л.: Наука, 1981. - 187 с.
50. Кнороз В.С. Естественная отметка русел, образованных материалами неоднородной крупности // Изв. ВНИИГ, 1962, т. 70, с. 21-51.
51. Ковальчук И.П. Динамика эрозионных процессов в Западной Подолии: Автореф. дис... канд. геогр. н. - М., 1981. - 24 с.
52. Ковальчук І. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. - Львів: Інститут українознавства, 1997. - 440 с.
53. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сниценко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. - Л.: Гидрометеиздат, 1982. - 272 с.
54. Константинова И.М. Состав речных илов и распределение в них рудных элементов на участках потоков рассеяния в Восточном Забайкалье: Автореф. дис... канд. геол.-мин. н. - Иркутск, 1970. - 31 с.
55. Красинцева В.В., Кузьмина Н.П., Сенявин М.М. Формирование минерального состава речных вод. - М.: Наука, 1977. - 176 с.
56. Кузин П.С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1960. - 455 с.
57. Кузменко И.Т., Павлова М.П., Богомолова Р.Т. и др. Почвы и первичная биологическая продуктивность пойм рек Центральной России. - М.: Наука, 1977. - 145 с.
58. Кузнецов В.А. Геохимия аллювиального литогенеза. - Минск: Наука и техника, 1973. - 280 с.
59. Кузнецов В.А. Геохимия речных долин. - Минск: Наука и техника, 1986. - 303 с.
60. Кузьмин И.А. Русловые процессы и их изменение под воздействием гидротехнических сооружений // Тр. Гидропроекта, 1973, сб. 30, с. 37-73.
61. Кужал З. Скорость геологических процессов: Пер. с чешск. - М.: Мир, 1987. - 246 с.
62. Кукушкин Ю.Н. Соединения высшего порядка. - Л.: Химия, 1991. - 112 с.
63. Кульский Л.А. Теоретическое обоснование технологии очистки воды. - Киев: Наукова думка, 1968. - 128 с.
64. Лаврушин Ю.А. Типы четвертичного аллювия нижнего Енисея. - М.: Изд-во АН СССР, 1961. - 95 с.
65. Лаврушин Ю.А. Аллювий равнинных рек субарктического пояса и перигляциальных областей материковых оледенений. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 266 с.
66. Лазаренко А.А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны. - М.: Наука, 1964. - 236 с.
67. Ламакин В.В. О динамических особенностях аллювиальных отложений // ДАН СССР, 1947, 57, № 1, с. 650-68.
68. Ламакин В.В. Динамические фазы речных долин и аллювиальных отложений // Землеведение, 1948, т. 2 (42), с. 154-187.
69. Латин И.А., Едигарова И.А. Взаимодействие экзометаболических водных организмов с ионами тяжелых металлов в природных водах (обзор) // Гидробиологический журнал, 1990, 26, № 2, с. 3-11.
70. Латин И.А., Красюков В.Н. Роль гумусовых веществ в процессах комплексобразования и миграции металлов в природных водах // Водные ресурсы, 1986, № 1, с. 134-145.
71. Лидер М. Седиментология. Процессы и продукты: Пер. с англ. - М.: Мир, 1986. - 439 с.

72. *Линник П.Н.* Комплексообразующая способность природных вод и методы ее определения (обзор) // *Гидрохим. мат-лы*, 1989, т. CVI, с. 78-101.
73. *Линник П.Н., Набиванец Б.И.* Методы исследования состояния ионов металлов в природных водах // *Водные ресурсы*, 1980, № 5, с. 148-179.
74. *Линник П.А., Набиванец Б.И.* Комплексообразование ионов металлов в природных водах // *Гидробиол. журн.*, 1983, 19, № 3, с. 83-95.
75. *Линник П.Н., Набиванец Б.И.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. - Л.: Гидрометеиздат, 1986. - 270 с.
76. *Лопатин Г.В.* Наносы рек СССР. - М.: Географгиз, 1952. - 366 с.
77. *Лопатин Г.В.* Опыт анализа зависимости средней мутности речных вод от главнейших природных факторов водной эрозии // *Изв. АН СССР, сер. геогр.*, 1958, № 4.
78. *Лунев Б.С.* Дифференциация осадков в современном аллювии. - Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 1967. - 333 с.
79. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. - М.: Изд-во АН СССР, 1955. - 347 с.
80. *Маккавеев Н.И.* Сток и русловые процессы. - М.: Изд-во МГУ, 1971. - 115 с.
81. *Маккавеев Н.И.* Эрозионно-аккумулятивные процессы и рельеф русла реки. Избранные труды. - М.: Изд-во МГУ, 1998. - 285 с.
82. *Маккавеев Н.И., Чалов Р.С.* Русловые процессы. - М.: Изд-во МГУ, 1986. - 264 с.
83. *Манская С.М., Кодина Л.А.* Геохимия лигнина. - М.: Недра, 1975. - 232 с.
84. Методические рекомендации по литохимическим методам поисков рудных месторождений по потокам рассеяния / Г.И. Хорин, В.П. Бородин, А.А. Матвеев. - М.: ИМГРЭ, 1992. - 164 с.
85. *Мирихулава Ц.Е.* Основы физики и механики эрозии русел. - Л.: Гидрометеиздат, 1988. - 303 с.
86. *Муравейский С.Д.* Роль географических факторов в формировании географических комплексов // *Вопросы географии*, 1948, вып. 9, с. 95-110.
87. *Мур Дж., Рамамурти С.* Тяжелые металлы в природных водах: Контроль и оценка влияния: Пер. с англ. - М.: Мир, 1987. - 288 с.
88. *Набиванец Б.И., Линник П.Н.* Методика исследования комплексообразования марганца в природных водах // *Проблемы охраны вод*, 1978, вып. 9, с. 23-29.
89. *Набиванец Б.И., Линник П.Н., Калабина Л.В.* Кинетические методы анализа природных вод. - Киев: Наукова думка. 1981. - 138 с.
90. *Нежиховский Р.А.* Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. - Л.: Гидрометеиздат, 1971. - 476 с.
91. *Общая гидрология (гидрология суши): Учебник для вузов.* - Л.: Гидрометеиздат, 1984. - 422 с.
92. *Оллиер К.* Выветривание: Пер. с англ. - М.: Недра, 1987. - 348 с.
93. *Осовецкий Б.М.* Крупность тяжелых минералов голоценового аллювия нижнего течения р. Вятки // *Аллювий*. Вып. 1. - Пермь: ПГУ, 1967, с. 55-64.
94. *Осовецкий Б.М.* О связи минерального состава тяжелой фракции аллювиальных отложений с их гранулометрией // *Литология и полезные ископаемые*, 1974, № 1, с. 96-109.
95. *Павлов А.П.* Избранные сочинения. Вып. 1. - М.: Изд-во МОИП, 1948. - 216 с.
96. *Перельман А.И.* Геохимия эпигенетических процессов. - М.: Недра, 1968 - 331 с.

97. *Перельман А.И.* Биокосные системы Земли. - М.: Наука, 1977. - 160 с.
98. *Перельман А.И.* Геохимия природных вод. - М.: Наука, 1982. - 154 с.
99. *Петтиджон Ф.Дж.* Осадочные породы: Пер. с англ. - М.: Недра, 1981. - 751 с.
100. *Поликарпочкин В.В.* Вторичные ореолы и потоки рассеяния. - Новосибирск: Наука, 1976. - 407 с.
101. *Полынов Б.Б.* Учение о ландшафтах // Вопросы географии, 1953, вып. 33, с. 30-44.
102. *Прокофьев А.К.* Формы следовых элементов в абиотических фазах природных водных систем // Успехи химии, 1986, 55, вып. 6, с. 1023-1052.
103. Работа водных потоков. - М.: Изд-во МГУ, 1987. - 194 с.
104. *Ревин В.В.* Четвертичные пески и песчано-гравийные отложения. - М.: Недра, 1977. - 184 с.
105. *Рединг Х.Г., Коллинсон Дж. Д., Аллен Ф.А. и др.* Обстановки осадконакопления и фации: В 2 т. Т. 1: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. - 352 с.
106. *Рейнек Г.Э., Сингх И.Б.* Обстановки терригенного осадконакопления: Пер. с англ. - М.: Недра, 1981. - 439 с.
107. Ресурсы поверхностных вод СССР. Верхне-Волжский район. Т. 10, кн. 1. - М.: Гидрометеиздат, 1973. - 476 с.
108. *Ржаницын Н.А.* Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. - Л.: ГИМИЗ, 1960. - 238 с.
109. *Россинский К.И., Дебольский В.К.* Речные наносы. - М.: Наука, 1980. - 218 с.
110. *Россинский К.И., Кузьмин И.А.* Закономерности формирования речных русел // Русловые процессы. - М., 1958, 5-14.
111. Русловой процесс. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. - 371 с.
112. Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР). - М.: Геофак МГУ, 1994. - 336 с.
113. *Ряпина В.Е.* О некоторых закономерностях распределения терригенных минералов в различных фракциях современного аллювия р. Волги // Бюлл. МОИП, отд. геол., 1961, 36, вып. 1, с. 106-114.
114. *Сидорчук А.Ю.* Структура рельефа речного русла. - СПб.: Гидрометеиздат, 1992. - 126 с.
115. *Силаев В.И., Сокерин М.Ю., Тихомиров В.Д. и др.* Гидроксиды марганца в аллювии как пример аквагенного минералообразования // Литология и полезные ископаемые, 2000, № 4. С. 364-375.
116. *Симонов Ю.Г., Борсук О.А., Ларьков С.А. и др.* Начальные этапы перемещения вещества на континентах (на примере Забайкалья) // Механическая дифференциация твердого вещества на континенте и шельфе. - М.: Наука, 1978, с. 7-18.
117. *Сироткина И.С., Варшал Г.М., Лурье Ю.Ю., Степанова Н.П.* Применение целлюлозных сорбентов и сефадексов в систематическом анализе органических веществ природных вод // ЖАХ, 1974, 29, № 8, с. 1626-1633.
118. *Сироткина И.С., Загудаева Н.С., Варшал Г.М.* Хроматографическое разделение органических веществ речных вод на сефадексах // Гидрохим. мат-лы, 1973, т. 57, с. 153-163.
119. *Смирнов М.П., Тарасов М.Н., Демидов В.Д.* Содержание гумусовых кислот в речных водах СССР // Гидрохим. мат-лы, 1978, т. 74, с. 11-17.
120. *Соколов А.А.* Гидрография СССР (воды суши).- Л.: Гидрометеиздат, 1964. - 535 с.

121. *Соколовский Д.Л.* Речной сток. - Л.: Гидрометеиздат, 1968. - 539 с.
122. *Старостина И.В.* Формирование стока наносов и возможность его прогноза во время весеннего половодья (на примере рек бассейна Оки): Автореф. дис... канд. геогр. н. - М., 1972. - 30 с.
123. Сток наносов. Его изучение и географическое распределение. - Л.: Гидрометеиздат, 1977. - 240 с.
124. *Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза: Т. 1. - М.:Изд-во АН СССР, 1960. - 212 с.
125. *Страхов Н.М.* Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. - М.: Гостеолтехиздат, 1963. - 535 с.
126. *Страхов Н.М.* Избранные труды. Общие проблемы геологии, литологии и геохимии. - М.: Наука, 1983. - 640 с.
127. Условия древнего осадконакопления и их распознавание: Пер. с англ. - М.: Мир, 1974. - 327 с.
128. Химия океана. Т. 1: Химия вод океана. - М.: Наука, 1979. - 518 с.
129. Химия промышленных сточных вод: Пер. с англ. - М.: Химия, 1983. - 359 с.
130. *Хортон Р.Е.* Эрозионное образование рек и водосборных бассейнов: Пер. с англ. - М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1948. - 158 с.
131. *Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. - М.: Изд-во МГУ, 1979. - 234 с.
132. *Чеботарев А.И.* Гидрологический словарь. - Л.: Гидрометеиздат, 1978. - 308 с.
133. *Чеботарев Н.П.* Учение о стоке. - М.: Изд-во МГУ, 1962. - 406 с.
134. *Чухров Ф.В.* Коллоиды в земной коре. - М.: Изд-во АН СССР, 1955. - 671 с.
135. *Шамов Г.И.* Речные наносы. - Л.: Гидрометеиздат, 1959. - 378 с.
136. *Шанцер Е.В.* Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строений и формирования аллювиальных свит. - М.: Изд-во АН СССР, 1951. - 275 с.
137. *Шанцер Е.В.* Типы аллювиальных отложений // Вопросы геологии антропогена. - М.: Изд-во АН СССР, 1961, с. 188-199.
138. *Шанцер Е.В.* Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований. - М.: Наука, 1966. - 240 с.
139. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. - М.: Недра, 1998. - 366 с.
140. *Шимановский Л.А.* О вторичных процессах формирования аллювия, обусловленных деятельностью подземных вод // Аллювий. - Пермь: ПГУ, 1967, с. 80-91.
141. *Щербаков А.В.* Геохимические критерии окислительно-восстановительных обстановок в подземной гидросфере // Сов. геология, 1956, № 56, с. 72-82.
142. *Щукин И.С.* Общая геоморфология. Т. 1. - М.: Изд-во МГУ, 1960. - 615 с.
143. *Эдельштейн К.К., Смахтина О.Ю.* Генетическая структура речного стока и химико-статистический метод выделения ее элементов // Водные ресурсы, 1991, № 1, с. 5-20.
144. Эрозионные процессы. - М.: Мысль, 1984. - 255 с.
145. *Янин Е.П.* Экогеохимическая оценка загрязнения реки Нуры ртутью. - М.: ИМГРЭ, 1989. - 43 с.

146. Янин Е.П. Геохимические особенности и экологическое значение техногенных илов // Разведка и охрана недр, 1994, № 5, с. 35-37.
147. Янин Е.П. Тяжелые металлы в эпифитовзвеси – индикаторы техногенного загрязнения рек // Разведка и охрана недр, 1995, № 6, с. 27-28.
148. Янин Е.П. Эпифитовзвесь – индикатор загрязнения речных систем тяжелыми металлами // Водные ресурсы, 1999, т. 26, № 6, с. 731-734.
149. Янин Е.П. Техногенез и эколого-геохимические аспекты аллювиального осадконакопления в реках промышленно-урбанизированных территорий // Геол. вестник Центр. районов России, 1999, № 4, с. 41-47.
150. Янин Е.П. Эпифитовзвесь - новый индикатор загрязнения речных систем тяжелыми металлами. - М.: ИМГРЭ, 2002. - 51 с.
151. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). - М.: ИМГРЭ, 2002. - 52 с.
152. Янин Е.П. Техногенные речные илы в зоне влияния промышленного города (формирование, состав, геохимические особенности). - М.: ИМГРЭ, 2002. - 100 с.
153. Янин Е.П., Разенкова Н.И., Журавлева М.Г. Техногенные илы - потенциальный источник вторичного загрязнения речных систем // Геоэкологические исследования и охрана недр. - М.: Геоинформмарк, 1992, вып. 1, с. 43-52.
154. Яцимирский К.Б. Устойчивость комплексных соединений в водных растворах // Успехи химии, 1953, 22, № 4.
155. Allen J.R.L. A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments // Sedimentology, 1965 5, № 2, p. 9-191.
156. Andrews-Jones D.A. The application of geochemical techniques to mineral exploration // Miner. Ind. Bull., 1968, 11, № 6, p. 1-31.
157. Aston S.R., Thornton I., Webb J.I. et al. Stream sediment composition: an aid to water quality assessment // Water, Air and Soil Pollution, 1974, 3, p. 321-325.
158. Bagnold R.A. An approach to the sediment transport problem from general physics // U. S. Geol. Survey Prof. Paper, 1966, № 422-1.
159. Bailey G.W., White J.L. Review of adsorption and desorption of organic pesticides by soil colloids, with implications concerning pesticide bioactivity // J. Agric. Food Chem., 1964, 12, p. 324-332.
160. Berner R.A. A new geochemical classification of sedimentary environments // J. Sediment. Petrol., 1981, 51, № 2, p. 359-365.
161. Bowen H.J.M. Environmental Chemistry of the Elements. - Academic Press: London etc., 1979. - 317 p.
162. Clarke F. W. The Date of Geochemistry.- U. S. Geol. Surv. Bul., v. 770, 1924.- 841 p.
163. Connell Des W., Miller G.J. Chemistry and ecotoxicology of pollution. - N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1984. - 423 p.
164. Florence T.M. Trace metal species in fresh waters // Water Res., 1977, 11, № 8, p. 681-687.
165. Florence T.M., Batley G.E. Chemical speciation in natural waters // CRC Critical Rev. Anal. Chem., 1980, 9, № 3, p. 219-296.
166. Förstner U., Wittmann G.T.W. Metal pollution in the aquatic environment. - Berlin etc.: Springer-Verlag, 1979. - 486 p.
167. Ganje T.J., Elseewi A.A., Page A.L. Trace element accumulation in aquatic plants: A literature review // Trace Substances Envir. Health – XXII: Proc. Univ. Missouri's 22nd Annu. Conf., St. Louis, Mo, May 23-26, 1988.- Columbia (Mo), 1988, p. 442-462.

168. *Garrels R.M., Mackenzie F.T., Hunt C.* Chemical cycle and the global environment.- Los Atlos (cal): William Kaufmann inc., 1973. - 206 p.
169. *Gibbs R.* Mechanisms controlling word water chemistry // *Science*, 1970, 170, № 3962, p. 1088-1090.
170. *Gregory K.J.* Fluvial processes in British basins. The impact of hydrology and the prospect for hydrogeomorphology // *Geomorphol.: Present-Probl. and Future Prospects.*- Oxford, 1978, p. 40-72.
171. *Jenne E.A.* Trace elements sorption by sediments and soils – sites and processes // *Symposium on Molybdenum in the Environment*, v. 2.- Marcel Dekker, New York, 1977, p. 425-553.
172. *Kukal Z.C.* Geology of recent sediments. - Prague: Acad. Press., 1978. - 363 p.
173. *Livingstone D.A.* Chemical composition of rivers and lakes: Date of geochemistry // *U.S. Geol. Survey Profess.*, 1963, Paper 440 G, p. G1-G64.
174. *Martin J.M., Meybeck M.* The content of mayor elements in the dissolved and particulate load of river // *Biogeochemistry of estuarine sediments.* – Paris: UNESCO, 1978, p. 95-110.
175. *Meybeck M.* Concentrations des aux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans // *Rev. geol. dynam. et géogr. phys.*, 1979, 21, № 3, p. 215-246.
176. *Millis N.F.* Microorganisms and the aquatic environment // *Hydrobiologia*, 1989, 176, № 1977, 355-368.
177. *Valentini M.T.G., Maggi L., Stella R., Ciceri G.* Metal-humic and fulvic acid interactions in fresh water ultrafiltrate fraction // *Chem. Ecol.*, 1983, 1, № 4, p. 279-291
178. *Zyka V.* Průměrné chemické složení povrchových a spodních (sladkých) vod // *Sbor. geol. ved. TG*, 1972, 10, s. 69-90

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Общая характеристика речных отложений и условий их образования.....	6
Эрозионно-аккумулятивные процессы в бассейнах и руслах равнинных рек.....	14
Общая характеристика русловой сети и водных потоков.....	14
Питание рек осадочным материалом.....	23
Руслоформирующая деятельность рек.....	30
Речные отложения и русловые формы рельефа.....	41
Водная биота и ее роль в процессах руслового осадконакопления.....	53
Геохимические условия аллювиальной обстановки осадконакопления.....	58
Химический состав речных вод и его формирование.....	59
Основные процессы, определяющие поведение химических элементов в речных водах.....	65
Речная взвесь и ее геохимическая роль.....	82
Строение, состав и геохимические особенности аллювиальных отложений.....	86
Общие схемы формирования аллювия.....	86
Особенности строения аллювия.....	97
Гранулометрический состав и минералогические особенности аллювия.....	99
Геохимические особенности руслового аллювия.....	113
Русловые илы.....	120
Заключение.....	129
Литература.....	131

-

Янин Евгений Петрович

Русловые отложения равнинных рек
(геохимические особенности условий формирования и состава)

Утверждено к печати
Институтом минералогии, геохимии
и кристаллохимии редких элементов

Редактор Т.И. Нефелова

Подписано к печати 11.12.2002.
Формат 60 x 90 1/16. Уч. изд. л. 8,7.
Тираж 150. Заказ 17-2002.
Полиграфическая база ИМГРЭ.