

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

**Мохамед Яссер Элсайед Шаабан**

**ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУКТУРЫ ПОТОКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В  
ЗАСУШЛИВЫХ РЕГИОНАХ (НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ  
СИНАЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА, ЕГИПЕТ)**

Научная специальность 1.6.6. Гидрогеология

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

*Научный руководитель-  
кандидат геол.-мин. наук, доцент  
Н.А. Виноград*

Санкт-Петербург  
2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ .....	3
ГЛАВА 1. ТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕВЕРНОГО СИНАЯ И ФАКТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ .....	10
ГЛАВА 2. ОБЩАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕВЕРНОГО СИНАЯ.....	17
2.1. Топографическое и геоморфологическое описание.....	17
2.2. Климатические характеристики .....	23
2.3. Геологическое строение .....	26
ГЛАВА 3. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОГО СИНАЯ ПО ЗНАЧЕНИЯМ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОРОД.....	35
3.1. Гидрогеологические условия Северного Синая .....	35
3.2. Районирование Северного Синая по фильтрационным свойствам водовмещающих пород.....	50
ГЛАВА 4. ХАРАКТЕРИСТИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД СЕВЕРНОГО СИНАЯ.....	66
4.1. Водоносные горизонты четвертичных отложений.....	67
4.2. Водоносные горизонты дочетвертичных отложений.....	93
4.3. Районирование территории Северного Синая по минерализации подземных вод .....	115
ГЛАВА 5. СТРУКТУРА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА СЕВЕРНОМ СИНАЕ.....	121
5.1. Водоносные горизонты четвертичных отложений.....	122
5.2. Водоносные горизонты дочетвертичных отложений.....	127
5.3. Обобщенная структура фильтрационного потока подземных вод в пределах Северного Синая.....	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Арабская Республика Египет полностью расположена в зоне аридного климата. Нехватка воды для питьевых нужд, промышленных и сельскохозяйственных целей является большой проблемой. В настоящее время обеспечение водными ресурсами осуществляется в основном за счет поверхностных вод – р. Нил. При этом недавно возникли проблемы между государствами, географически связанными с рекой Нил (Египет, Эфиопия и Судан), в связи со строительством Эфиопской плотины, что в дальнейшем снизит доступность воды из р. Нил для Египта за счет увеличения водоотбора указанными странами. В связи с этим первостепенное значение приобретают проблемы добычи подземных вод на различных территориях Египта, в том числе и на Синайском полуострове.

**Цель работы.** Региональная гидрогеодинамическая и гидрогеохимическая характеристика территории одной из административных единиц Арабской Республики Египет – Северного Синая, составляющей по площади приблизительно половину Синайского полуострова, с целью обоснования в дальнейшем возможности прогнозирования добычи и управления на данной территории подземными водными ресурсами.

### **Основные задачи исследования:**

- Сбор, обобщение и систематизация всех материалов по геологическому строению и гидрогеологическим условиям изучаемой территории.
- Создание баз данных по гидродинамическим и гидрогеохимическим характеристикам водоносных горизонтов.
- Статистическая обработка данных по гидрогеодинамическим характеристикам водоносных горизонтов и по химическому составу подземных вод.

- Выявление генетических типов подземных вод, развитых в пределах Северного Синая.
- Районирование территории Северного Синая по значениям фильтрационных параметров водоносных горизонтов и по значению минерализации подземных вод. Построение карты-схемы генерального и локальных фильтрационных потоков подземных вод в пределах территории Северного Синая.

**Объектом исследования** являются водоносные горизонты, развитые на территории Северного Синая.

**Фактический материал** по гидрогеологическим, гидрогеодинамическим и гидрогеохимическим показателям по около 500 скважинам различного назначения на территории Северного Синая был собран автором в течение 2009–2020 г.г. в различных центрах и отделах, связанных с Министерством водных ресурсов и ирригации Египта, а также в отдельных негосударственных организациях.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы следующие методы:

- Изучение геологического строения и гидрогеологических условий территории Северного Синая по результатам обобщения опубликованных и фондовых материалов.
- Создание и корректировка баз данных по гидрогеодинамическим характеристикам, фильтрационным параметрам и химическому составу вод основных водоносных горизонтов.
- Получение различных статистических характеристик распределения значений гидрогеодинамических и гидрогеохимических показателей и соответствующих корреляционных зависимостей с использованием программы «SPSS Statistics 17.0.0».
- Компьютерное физико-химическое моделирование состояния подземных вод с оценкой степени их насыщенности по отношению к

основным карбонатным и сульфатным минералам с использованием программы «PHREEQC interactive 3.5.0.14000».

- Построение компьютерных карт гидрогеологического назначения с использованием программного пакета ГИС «ArcGIS Desktop 10.6-version 10.6.0.8321».
- Районирование изучаемой территории по обоснованным критериям (градациям) различных гидрогеодинамических и гидрогеохимических показателей.

**Научная новизна:**

- Впервые по данным более чем 500 скважин дана обобщённая характеристика условий залегания водоносных горизонтов, гидрогеодинамических и гидрогеохимических особенностей всей северной части Синайского полуострова.
- На основе собранного материала создана единая база данных по гидродинамическим характеристикам, фильтрационным параметрам и химическому составу вод водоносных горизонтов.
- Построены компьютерные карты кровли-подошвы и изопахит для всех выделяемых на Северном Синае водоносных горизонтов.
- Получены основные статистические характеристики распределения и корреляционные зависимости величины коэффициента фильтрации, минерализации и концентраций макрокомпонентов от различных параметров пород.
- Проведено районирование территории Северного Синая по величине коэффициента фильтрации и минерализации подземных вод.
- Выявлены и обоснованы основные генетические группы подземных вод, развитых в пределах Северного Синая.
- По 250 гидрогеологическим скважинам построена региональная карта обобщенного фильтрационного потока в пределах Северного Синая, где показано, что генеральное направление этого потока для всех

горизонтов в совокупности определяется в основном наличием главной региональной дрены – Средиземного моря – с осреднённым гидравлическим уклоном порядка 0,002. Внутренние, локальные направления потоков подземных вод определяются наличием локальных дрен, приуроченных к долинам вади.

- Показаны наиболее перспективные районы водоснабжения на основе четвертичных и дочетвертичных водоносных горизонтов. (четвертичный – вади Эль-Ариш и северо-западная часть Северного Синая; дочетвертичный – Эль-Кусаима, Гебель Эль-Магара, Рафах и Шейх Зувайид, Багдад, Гебель Либни и Гебель Ариф Эль-Нага).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Данная работа позволяет оценить региональные гидрогеодинамические и гидрогеохимические особенности территории Северного Синая. Результаты обеспечат основу для административных органов Арабской Республики Египет при составлении плана устойчивого развития Северного Синая с учетом доступности подземных вод для водоснабжения различных жилых, сельскохозяйственных и промышленных объектов.

#### **Защищаемые положения:**

1. Проведено районирование территории по значениям коэффициентов фильтрации для каждого водоносного горизонта с целью определения наиболее перспективных районов для добычи подземных вод. Путем статистического обоснования по 180 гидрогеологическим скважинам выявлены характерные значения коэффициентов фильтрации для различных типов пород.

2. Вплоть до максимально опробованной глубины, минерализация и концентрации основных макрокомпонентов как в четвертичных, так и в дочетвертичных водоносных горизонтах были рассмотрены. На формирование химического состава подземных вод оказывают влияние несколько факторов: инфильтрационное питание атмосферными осадками

и/или поверхностными водами, метаморфизация (упаривание), интрузии морской воды из Средиземного моря, разбавление исходных седиментогенных вод инфильтрационными водами. Скорее всего, большинство вод имеют смешанный генезис.

3. Поток подземных вод направлен с юга на север, в сторону Средиземного моря, Суэцкого залива и залива Акаба, а также (в локальном смысле) к долинам основных вадии. Средний гидравлический уклон составляет около 0,002. Создана база данных по уровенному режиму подземных вод, четвертичных и до-четвертичных водоносных горизонтов. Построены карты гидро-изогипсы и гидро-изопьезы с использованием ГИС.

**Личный вклад автора.** Работа непосредственно над диссертацией выполнялась автором, начиная с 2017 года, на кафедре гидрогеологии Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) во время обучения в аспирантуре. В ее основу положены материалы, собранные лично автором за период (2017–20 гг.), а также, и в основном, за время работы на кафедре гидрологии Загазигского Университета (Египет) в качестве ассистента (2009–14 гг.) и младшего преподавателя (2014–16 гг.). Создание соответствующих баз данных, их статистическая обработка, составление компьютерных карт, выделение генетических групп подземных вод, а также районирование территории Северного Синая по различным параметрам произведено непосредственно автором.

**Достоверность** научных положений и выводов обосновывается качеством собранной автором по фондовым материалам первичной геологической, гидрогеологической, гидрогеодинамической и гидрогеохимической информации, а также апробацией работы на конференциях по наукам о Земле.

**Апробация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 2 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 1 статья в рецензируемых журналах из перечня Web of science, а также 3 работы,

индексированные в РИНЦ. Автор участвовал в конференциях: «Геология, геоэкология, эволюционная география» (Санкт-Петербург, 2020 г.), «XVII Большой географический фестиваль» (Санкт-Петербург, 2021 г.) и в XXIII совещании «Подземные воды Востока России» (Иркутск, 2021 г.).

**Структура и объем работы.** Работа включает введение, 5 глав и заключение. Общий объем диссертации составляет 152 страниц, включая 96 рисунков и 25 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю к.г.-м.н., доценту Н.А. Виноград за общее научное и организационное руководство работой и многие полезные идеи; научному консультанту к.г.-м.н. А.А. Потапову за определение многих научных подходов и большую помощь в обработке результатов; всему профессорско-преподавательскому составу кафедры гидрогеологии СПбГУ за консультации в процессе написания работы, а также ассистенту А.С. Ивлевой за ценную помощь в подготовке диссертации.

#### **Публикации в журналах, рецензируемых ВАК:**

1. Мохамед Я.Ш., Виноград Н.А., Потапов А.А. (2020). Оценка условий фильтрации через земляные плотины при изменении их параметров с использованием программы Z\_SOIL // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. № 2. С. 90-97. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.2/2863>
2. Мохамед Я.Ш. и др., (2021). Природные и техногенные факторы формирования фильтрационных потоков подземных вод Северного Синая // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. № 4. С. 71-81. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.4/3792>

#### **Публикации в журналах Web of Science Core Collection, Scopus, RSCI:**

3. Mohamed Ya. Sh., Lisetskii F. N., Budarina V. A., Vinograd N. A., Potapov A. A., (2021). Justification for Effective Water Planning and Management in the North of the Sinai Peninsula, Egypt // Journal Bioscience Biotechnology Research Communications. Vol. 14, No. 03, pp. 986-992. DOI: <http://dx.doi.org/10.21786/bbrc/14.3.13>

#### **Другие публикации:**

4. Мохамед Я.Ш., Виноград Н.А., Потапов А.А. (2020). Структура фильтрационных потоков подземных вод на севере Синайского полуострова // Геология, геоэкология,

эволюционная география: Коллективная монография. Том XIX / Под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Снытко. -СПБ.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена. № 36. С. 259-262. ISBN 978-5-8064-2986-6

5. Мохамед Я.Ш. и Виноград Н.А., (2021). Отслеживание естественного направления потока подземных вод на Северном Синае // Мат-лы XVII Большого географического фестиваля, посвященного 195-летию российского кругосветного путешествия Ф.П. Литке (1826-1829 гг.) - (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле). С. 205-209. ISBN 978-5-4386-2045-7

6. Мохамед Я.Ш. и Виноград Н.А., (2021). Районирование севера Синайского полуострова по фильтрационным свойствам дочетвертичных водовмещающих пород // Подземная гидросфера: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. –С. 93-95. DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-93-95

## ГЛАВА 1. ТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕВЕРНОГО СИНАЯ И ФАКТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Арабская Республика Египет целиком находится в зоне аридного климата и её площадь в основном представлена пустынями. Только 3 % земель (в основном в долине р. Нил) обрабатывается [60]. Нехватка воды для питьевых, культурно-бытовых, технических и сельскохозяйственных нужд представляет большую проблему для Республики Египет, территория которой находится в регионе с аридным климатом.

В 1966 году возобновляемые водные ресурсы в Египте составляли 2189 м<sup>3</sup> на душу населения в год. В настоящее время водные ресурсы Египта сократились примерно до 670 м<sup>3</sup>/чел/год [15]. Это происходит главным образом из-за постоянного ежегодного прироста населения на уровне 2,2 %. Ожидаемый рост населения Египта к 2025 году составляет примерно до 105 миллионов человек, что приведет к снижению доступности воды на душу населения и к дефициту воды, если общая доступность воды останется неизменной. В связи с этим проблемы добычи подземных вод и управления водными ресурсами являются задачами первостепенной важности.

Более того, проблемы, которые в последние годы возникли между государствами, территориально связанными с р. Нил (Египет, Эфиопия и Судан), создают угрозу снижения доступности воды в Республике Египет. Данные проблемы выражаются, например, в увеличении отвода воды из р. Нил для орошения. Особой проблемой является строительство Эфиопской плотины, для которой потребуется заполнение Нильского водохранилища площадью около 70 млрд. м<sup>3</sup> [15].

Таким образом, на сегодняшний день существует острая необходимость в поиске дополнительных источников для решения проблемы прогнозируемой нехватки воды в Республике Египет. Одним из этих источников являются подземные воды. Сейчас в Республике Египет

ресурсы пресных подземных вод составляют менее 20 % в общем балансе используемых водных ресурсов [15].

Чтобы справиться с проблемами, связанными с ростом населения и развитием социальной экономики, правительство Египта сосредоточилось на развитии Синайского полуострова, который, как предполагается, обладает высоким потенциалом для освоения минеральных ресурсов, организации туризма и ведения сельскохозяйственных работ.

Арабская Республика Египет полностью расположена в зоне аридного климата. Нехватка воды для питьевых нужд, промышленных и сельскохозяйственных целей является большой проблемой. В настоящее время обеспечение водными ресурсами осуществляется в основном за счет поверхностных вод – р. Нил. При этом недавно возникли проблемы между государствами, географически связанными с рекой Нил (Египет, Эфиопия и Судан), в связи со строительством Эфиопской плотины, что в дальнейшем снизит доступность воды из р. Нил для Египта за счет увеличения водоотбора указанными странами [32; 91]. В связи с этим первостепенное значение приобретают проблемы добычи подземных вод на различных территориях Египта, в том числе и на Синайском полуострове.

На Синайском полуострове, находящемся на значительном удалении от основного источника воды – р. Нил, другие источники водоснабжения, кроме подземных вод практически отсутствуют, по крайней мере в течение большей части года за рамками паводкового периода. Территория Синай полностью представлена пустынными землями, за исключением самой северо-восточной его части. В целом для Синайского полуострова характерен аридный климат - годовое количество осадков в различных районах оценивается в 40 – 300 мм (последнее именно на северо-востоке).

Освоение поверхностных вод на Синае до настоящего времени осуществлялось в некоторых районах путем строительства плотин и

организации временных водохранилищ, функционирующих только в паводковые периоды. В отдельных районах, таких как Эль-Ариш на северо-востоке и Эль-Тур на юго-западе, в качестве питьевой и поливной воды используются подземные воды, добываемые в основном из четвертичных отложений с глубины 50-100 м и более [81]. При этом чрезмерная откачка подземной воды в последние годы существенно ухудшила её качество, и, кроме того, водоносные горизонты в прибрежной зоне Средиземного моря подвержены проникновению морской соленой воды.

Проблема нехватки воды в Египте может быть частично решена и путем сбора и резервирования паводковых вод в земляных плотинах. В Арабской Республике Египет (ARE) использование земляных дамб для предотвращения риска наводнений и накопления поверхностных вод широко распространено, в том числе на Синайском полуострове [49; 80]. Для всех земляных плотин с водохранилищами характерна фильтрация воды через их насыпи, основания и прилегающие стороны долины – создается искусственный водоносный горизонт. Количественная оценка этого процесса – серьезная гидрогеологическая задача; также необходимо решить многие гидрологические и геоэкологические проблемы. Программа Z-SOIL, используемая для численного решения задачи, реализована на основе метода конечных элементов. Программа предназначена для моделирования нестационарной фильтрации с возможностью изменения уровня воды, размера фильтрующего объекта и свойств составляющих его грунтов. На Северном Синае есть группа важных плотин, собирающих и хранящих поверхностные воды во время паводков. Одной из самых важных плотин на Северном Синае, которая расположена на вадии-Ариш, является плотина Эль-Равфааха с объемом водохранилища  $5 \times 10^6$  м<sup>3</sup>. Кроме того, множество песчаных плотин имеется в районе вадии-Гарафи [4; 5].

Фильтрационный поток через насыпь с неустойчивыми граничными условиями представляет интерес для решения многих гидрологических и экологических проблем, таких как устойчивость земляных плотин или откосов с нестабильными граничными условиями уровня воды в гражданском строительстве, Взаимодействие поверхностных вод с грунтовыми водами в сценариях водных ресурсов, загрязнение подземных вод и его проникновение в окружающую среду, проникновение осадков, добыча нефти и вторжение морской воды из-за приливных колебаний в прибрежном водоносном горизонте [29; 59; 61; 64; и др.].

Эксперимент по моделированию фильтрации и проницаемости грунта был проведен автором на физической модели плотины в лабораторных условиях. Затем проводилась калибровка численной геофильтрационной модели в Z-SOIL путем сравнения модельных и экспериментальных данных. И, наконец, оценивалось влияние изменения геометрии плотины на уровень воды в водохранилище. В результате исследований автором доказано, что численная модель Z-SOIL с высокой степенью точности позволяет моделировать неустановившуюся фильтрацию через земляную плотину.

По результатам численного моделирования увеличение ширины гребня и высоты основания плотины, а также увеличение отношения горизонтального и вертикального коэффициентов фильтрации основания и насыпи ( $k_x/k_y$ ) плотины значительно уменьшают среднюю величину градиента напора подземных вод в теле плотины. При этом в случае нестационарной фильтрации скорости изменения напоров уменьшаются по длине пути фильтрации, т.е. максимальные изменения наблюдаются в верхнем бьефе.

Полученные результаты хорошо согласуются с практикой строительства и эксплуатации песчаных плотин [29; 61; 86; 95; 97; 103; и др.], поэтому

численная модель Z-SOIL может быть использована для проектирования и строительства.

Синайский полуостров (площадь: 61 000 км<sup>2</sup>, население: 559 071 человек в 2020 году) разделен на две административные провинции: мухафаза Северный Синай (население: 450 528 человек в 2020 году) и мухафаза Южный Синай (население: 108 543 человека в 2020 году) (рис. 1.1).

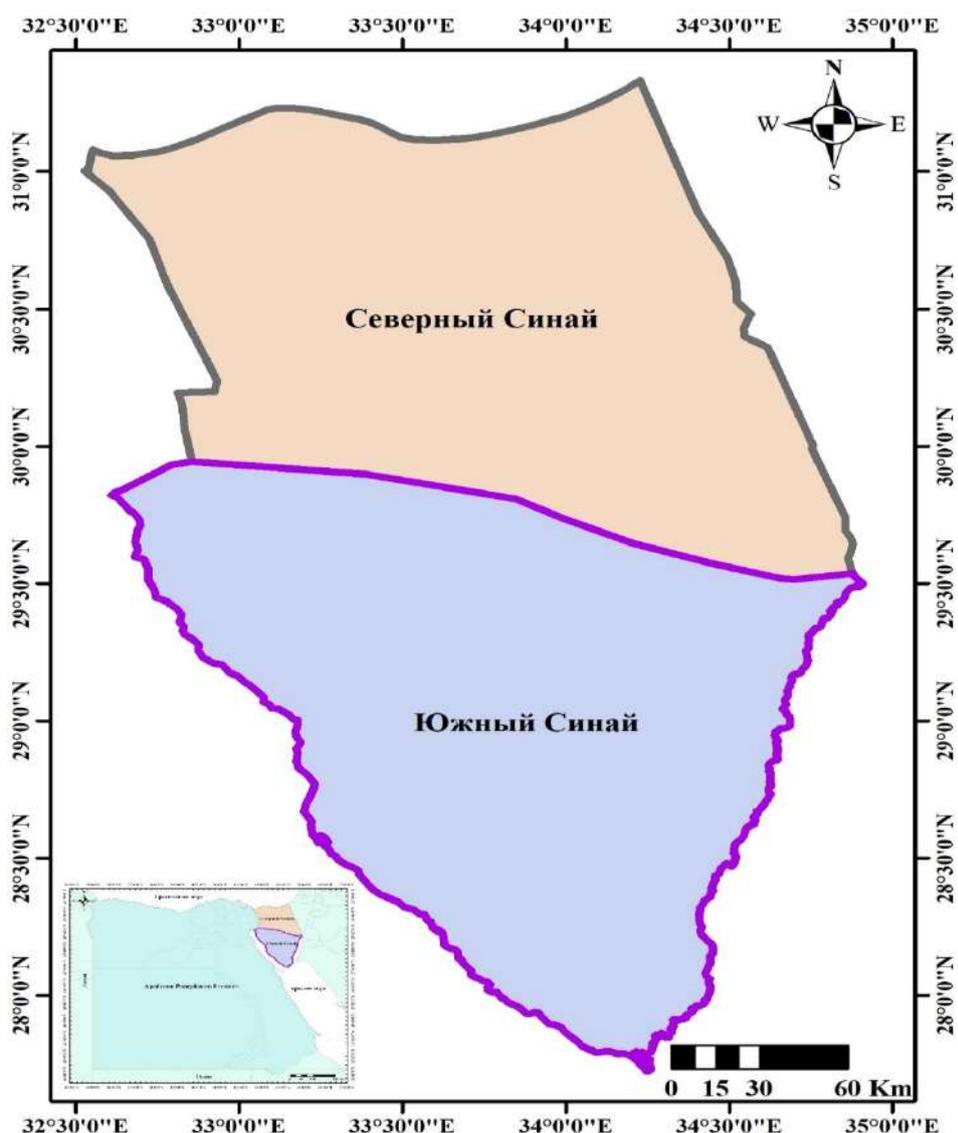


Рис. 1.1. Административные провинции Синайского полуострова

В представленной работе рассмотрены гидрогеологические условия развития различных водоносных горизонтов в пределах Северного Синая,

разделенного на пять административных районов: Эль-Ариш, Рафах, Шейх Зувайид, Бир Эль-Абд, Эль-Хассана и Нахл (рис. 1.2). Площадь Северного Синая - более 26 000 км<sup>2</sup>. Он расположен между 29° 35' и 31° 20' северной широты и 32° 30' и 34° 53' восточной долготы и простирается от границ мухафазы Исмаилия на западе до палестино-израильских границ на востоке, между Средиземным морем на севере до границы провинции Южный Синай на юге.

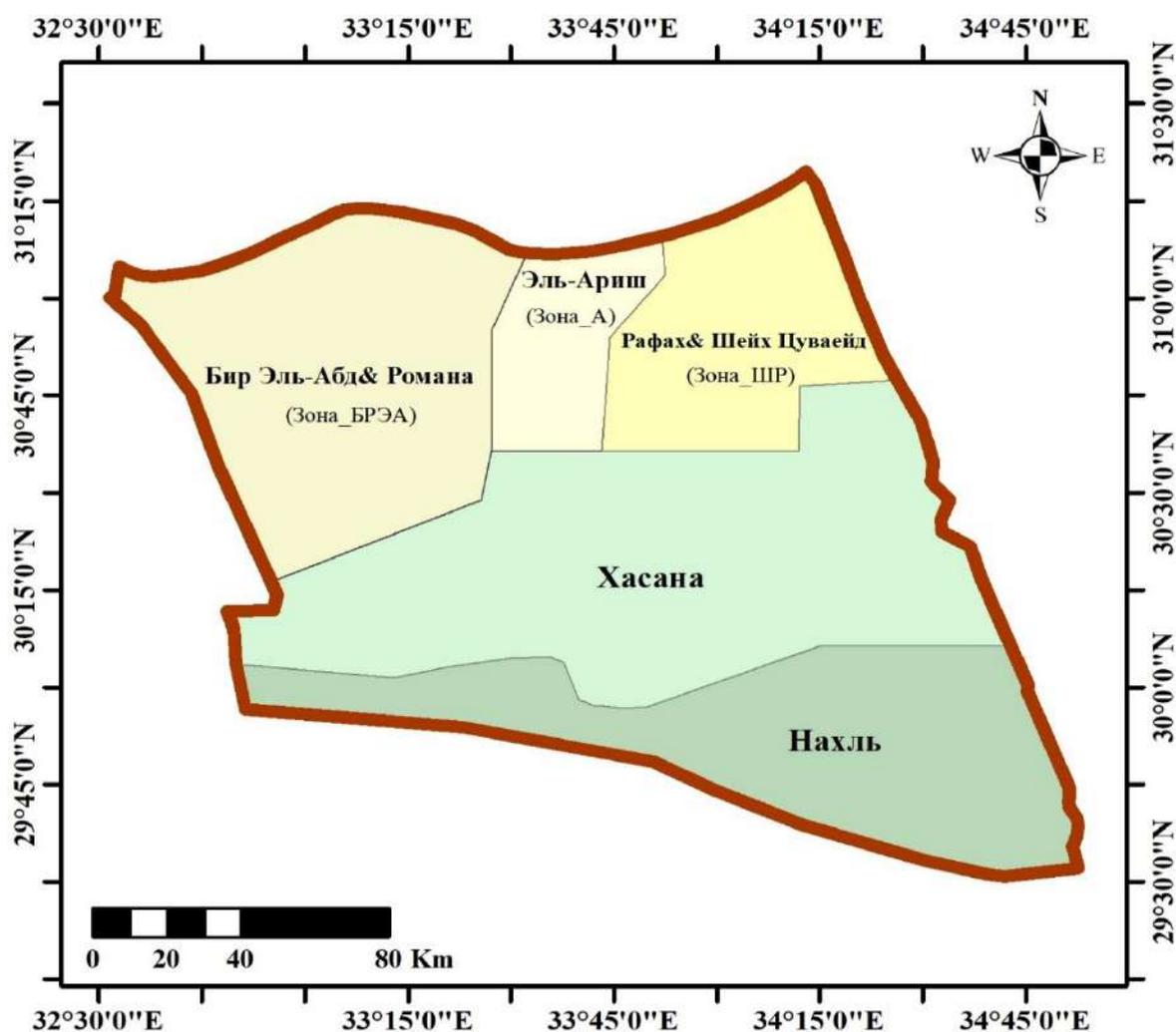


Рис. 1.2. Административные районы провинции Северный Синай

Большая часть фактического материала для данных исследований по геологическому строению и гидрогеологическим условиям, по фильтрационным и гидрохимическим свойствам водоносных горизонтов Северного Синая была взята из результатов многолетних работ, проведенных Научно-исследовательским институтом водных ресурсов

(WRRRI) в министерстве ирригации и водных ресурсов Республики Египет [7; 28; 87; и др.]. В рамках этих работ были представлены первичные данные по порядку 500 скважин, расположенным на Северном Синае (рис. 1.3) [31; 34; 71; 72; 73; 101; и др.].

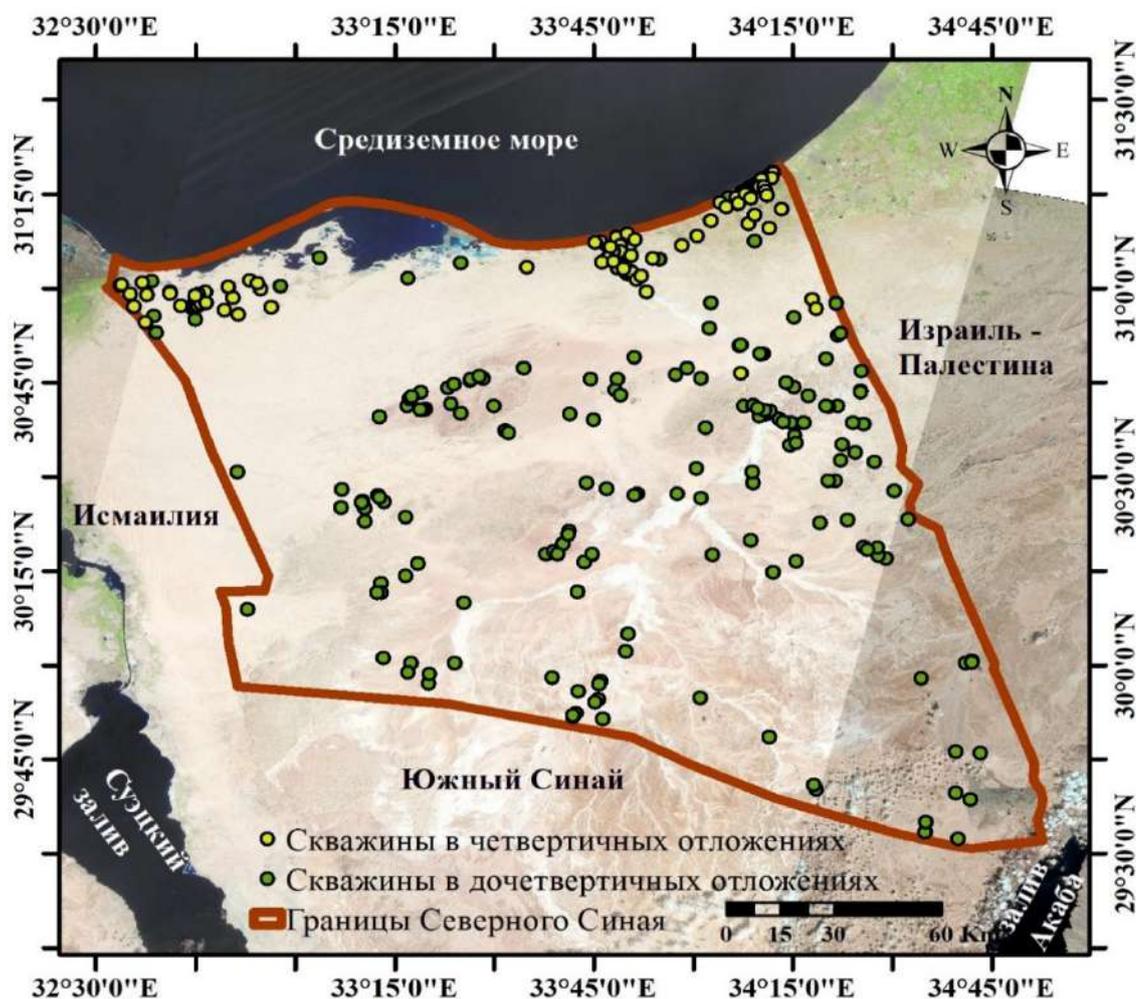


Рис. 1.3. Расположение исследовательских скважин в провинции Северный Синай

На первоначальном этапе исследований были проведены дополнение, обновление, корректировка, отбраковка и систематизация информации по всем существующим гидрогеологическим скважинам в районе Северного Синая. Результатом этой систематизации стали соответствующие базы данных по различным гидрогеологическим параметрам. Методология исследований подробно описана в соответствующих главах работы. Результаты исследований опубликованы автором [1; 2; 3; 4; 5; 76; и др.].

## ГЛАВА 2. ОБЩАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕВЕРНОГО СИНАЯ

### 2.1. Топографическое и геоморфологическое описание

Синайский полуостров расположен между двумя рукавами Красного моря: Суэцким заливом и заливом Акаба. Синай имеет форму треугольника с основанием, простирающимся вдоль берега Средиземного моря от Порт Фуада на западе до Рафаха на востоке длиной 200 км (рис. 2.1 и 2.2). Вершина треугольника лежит на крайнем юге в Рас Мохамед, который расположен в 390 км от побережья Средиземного моря. Западный берег протягивается примерно на 510 км, тогда как восточный берег – не более чем на 240 км. Воображаемая линия восточной политической границы между Синаем и Палестиной, от Рафаха на севере до Табы на заливе Акаба, простирается на 215 км. Общая площадь Синая составляет 61000 км<sup>2</sup>. Это в три раза больше, чем площадь дельты Нила. Область исследования в настоящей работе – это северная половина полуострова, относящаяся к административной провинции Северный Синай общей площадью 27574 км<sup>2</sup> (рис. 2.1) [72].

Синайский полуостров в целом, как видно на топографических картах по топографо-геодезическим признакам можно разделить на следующие части:

- Массив треугольной формы на юге, составляющий горную часть полуострова. Горы Моисей и Катарина являются наивысшими точками полуострова с абсолютными отметками 2629 м над уровнем моря.
- Центральное известняковое плато центрального Синая с абсолютными отметками порядка 1000 м над уровнем моря, состоящее в основном из мезозойских и третичных отложений. Оно глубоко расчленено

долинами, ограниченными крутыми откосами. Русла этих долин имеют резкий уклон, создавая водопады во время паводков.

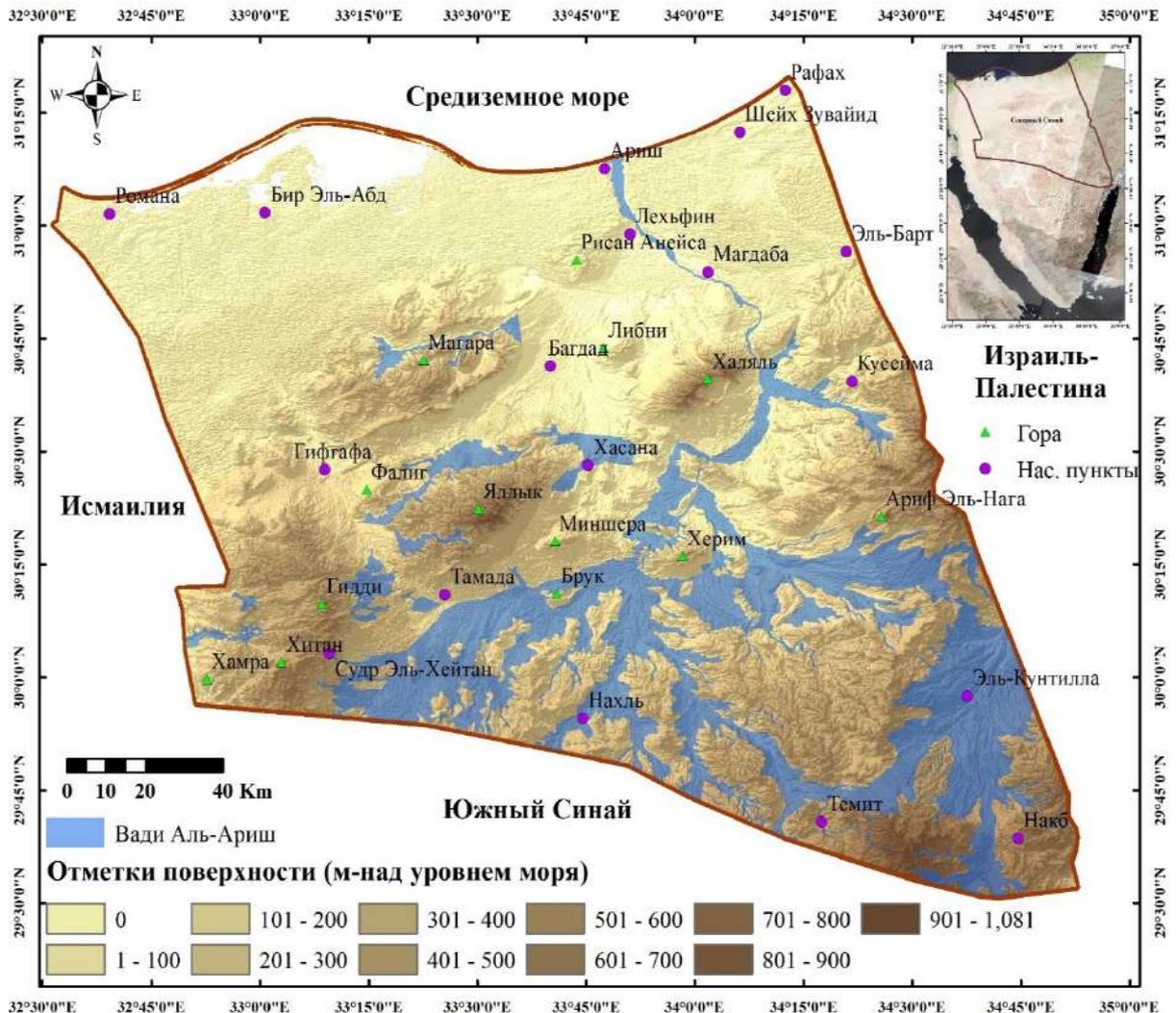


Рис. 2.1. Топографическая карта Синайского полуострова

- Холмы Рангдом, простирающиеся с северо-востока на юго-запад и ограниченные барханной равниной на севере и плато Эль Тих и Эгма на юге. Они имеют крутые и умеренно крутые склоны.
- Барханная равнина, которая простирается от Суэцкого канала на западе до Рафаха на востоке и от берега Средиземного моря на севере до холмов Рангдом на юге. Эти ветровые барханы быстро меняют свою форму и положение.
- Прибрежные равнины, простирающиеся вдоль Средиземного моря и вдоль Суэцкого залива и залива Акаба.

В северной части Синайского полуострова региональный склон разбивается на множество больших холмов и заканчивается на севере поясом низменностей с высокими песчаными дюнами вдоль побережья Средиземного моря. Различные морфологические особенности наблюдаются в исследуемой области Северного Синая [34; 60].

Таким образом, основными геоморфологическими единицами Синайского полуострова в целом являются центральное плато, складчатый пояс и прибрежные равнины (рис. 2.2) [99].

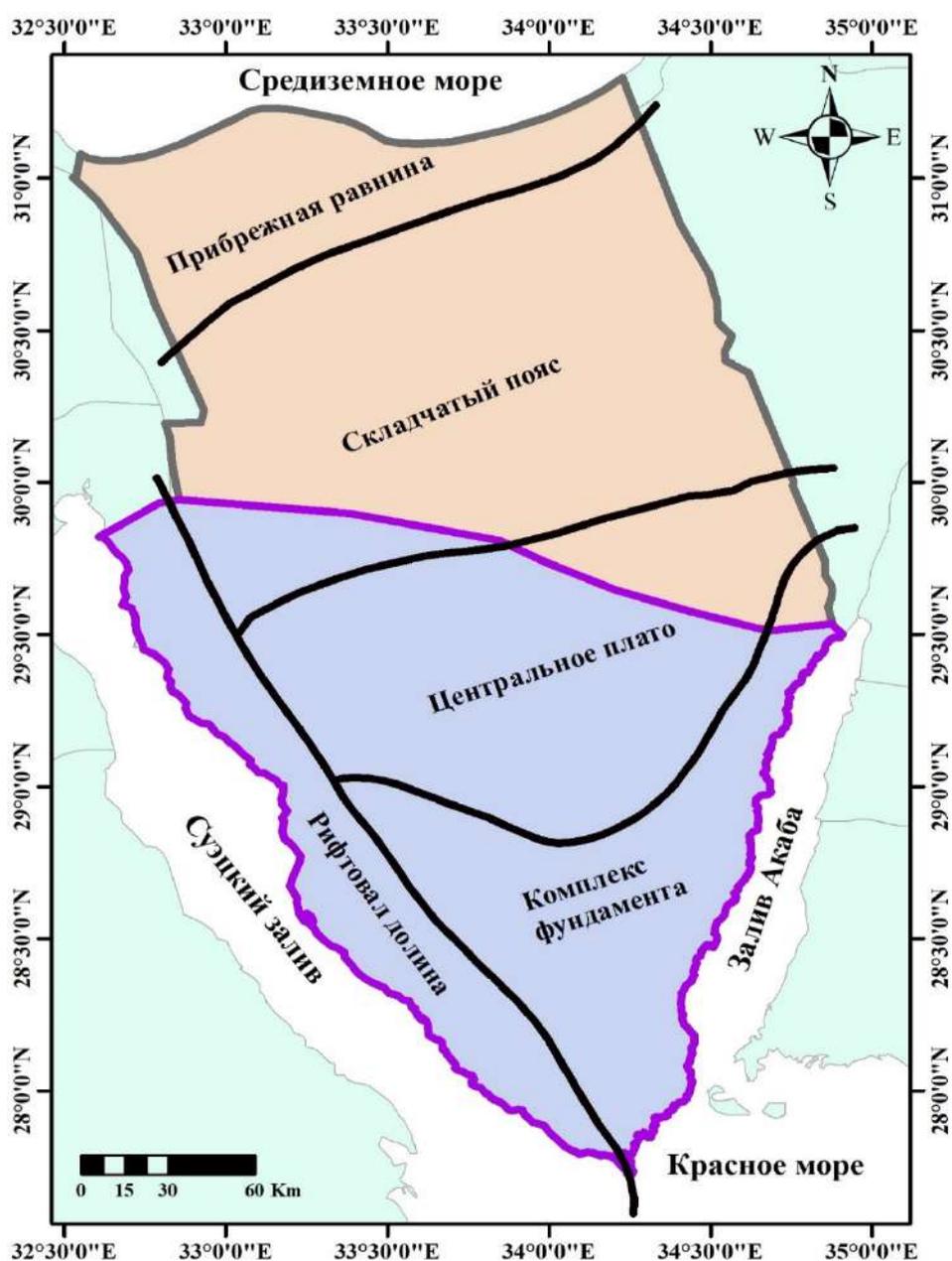


Рис. 2.2. Геоморфологические единицы Синайского полуострова

### Центральное плато

Большая часть поверхности плато покрыта палеогеновым известняком. С другой стороны, относительно мягкие породы, такие как мел и мергель верхнего мела, распределены внутри и вокруг долины. Они легко подвергаются эрозии.

### Складчатый пояс (Сирийская дуговая зона):

Район характеризуется большими горными блоками, которые относятся к Сирийской дуговой зоне. Гебель Магхара, Халяль и Еллек располагаются последовательно вдоль основной оси с северо-востока на юго-запад. Они состоят из двойных погруженных антиклинальных структур, где северная сторона, как правило, имеет небольшой наклон 10-20 градусов, а южная сторона нарушена разломами и складками. Большинство из этих гор в основном сложено известняками, мергелями и песчаниками, возраст которых варьирует от юры до верхнего мела. Холмы окружают эти горные районы. Много холмов, сложенных третичными и четвертичными делювиальными отложениями, расположены в верховьях дренажной системы Вади Эль-Ариш.

### Прибрежные равнины

Район представляет собой обширную равнину, сложенную аллювиальными и пролювиальными отложениями и песчаными дюнами. Как правило, равнина наклонена слегка на север. Узкая песчаная коса, окруженная лагунами, образующими лагунную изменчивость, тянется вдоль Средиземного моря. Прибрежная изменчивость находится вдоль лагуны Сабхет эль Бардавил и других областях вдоль побережья Средиземного моря.



Рис. 2.3. Изображения Вадии Эль-Ариш в паводковый период [youm7.com]

### Вади Эль-Ариш

Вади – распространенный термин в Северной Африке и может быть определен как река, которая является сухой в течение большей части года, за исключением сезона дождей [36; 41; 51; и др.]. Это, как правило, низменная широкая область в пустыне, которая при выпадении осадков заполняется водой, образуя оазис (рис. 2.3).

В дополнение к вышеуказанным геоморфологическим единицам на полуострове, дренажная система Вади Эль-Ариш является также одной из основных, наиболее крупных из вади, характерных единиц морфологии региона в целом и Северного Синая в частности. Исток берет свое начало от Гебель Эгма в центральном плато, проходя через Сирийскую дуговую зону и северную прибрежную равнину к Средиземному морю. Общая длина вади составляет 310 км. Площадь водосбора составляет около 20000 км<sup>2</sup>, что составляет треть всего полуострова (рис. 2.4) [73]. Притоки системы Вади Эль-Ариш, включая их поймы, сложены песком и гравием. Подземные воды присутствуют здесь только в периоды паводков.

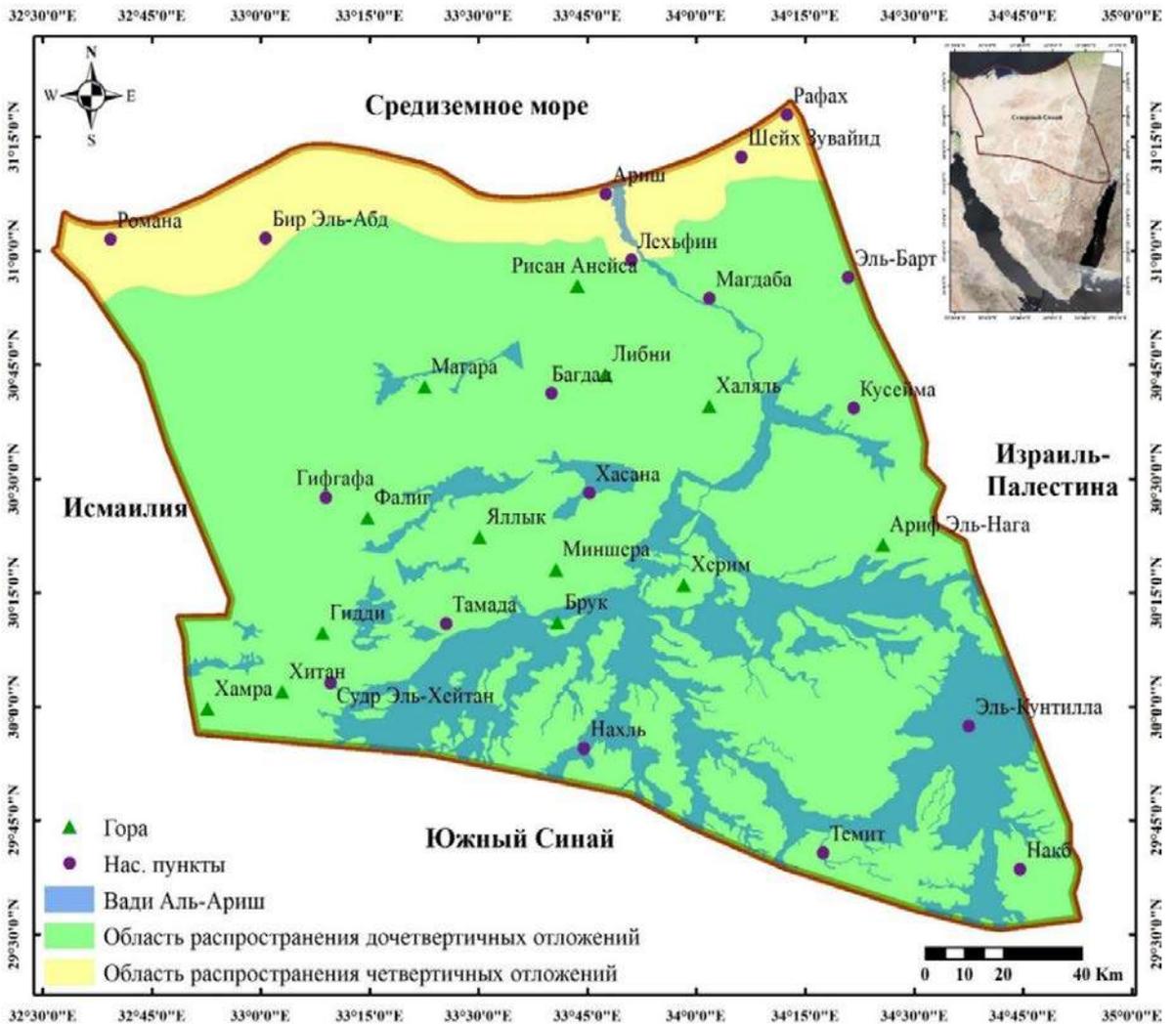


Рис. 2.4. Водосборная площадь Вади Эль-Ариш

## 2.2. Климатические характеристики

Температура воздуха в северной части Синая, как правило, выше, чем во внутренних областях полуострова. Средняя температура уменьшается в зимний период и достигает своего минимального значения в январе, увеличиваясь летом до максимума в августе [85; 96].

Средняя температура зимой составляет около  $+13^{\circ}\text{C}$  в Эль-Ариш, со средним минимальным значением  $+7^{\circ}\text{C}$  ранним утром и возрастанием обычно до  $+11^{\circ}\text{C}$  в полдень со средним максимумом около  $+18^{\circ}\text{C}$ .

Летом температура повышается до  $+26^{\circ}\text{C}$  (среднее значение в Эль-Ариш). Средняя летняя максимальная температура колеблется между  $+29,9^{\circ}$

С и  $+31,1^{\circ}\text{C}$ . В летние ночи температура воздуха падает до средней минимальной температуры  $+22^{\circ}\text{C}$ .

Весна характеризуется умеренной температурой около  $+20^{\circ}\text{C}$  с горячими периодами Хамсин, когда температура воздуха иногда поднимается выше  $+40^{\circ}\text{C}$ . Средняя минимальная температура в течение этого сезона составляет около  $+13^{\circ}\text{C}$ , в то время как средняя максимальная температура составляет  $+26^{\circ}\text{C}$ .

Осень характеризуется умеренными температурами, похожими на весенние и немного ниже, чем летние. Температуры в течение сентября обычно в диапазоне от  $+15^{\circ}\text{C}$  в полночь и  $+28^{\circ}\text{C}$  в полдень.

Атмосферные осадки всегда были серьезной проблемой на севере Синая. Наибольшее среднегодовое количество осадков до 300 мм/год наблюдается только на очень ограниченной территории, в районе Рафах, в самой северо-восточной части района исследования [72]. На более чем 80 % территории Северного Синая среднегодовое количество осадков составляет менее 60 мм/год, то есть большая часть исследуемой территории находится в обстановке аридного климата [31].

При этом чрезвычайно важной проблемой рассматриваемой аридной зоны является то, что осадки в паводковые периоды выпадают крайне неравномерно в различные годы (рис. 2.5). По этой причине северные районы Синая периодически подвергается либо сильной засухе, либо наводнениям, особенно вблизи вади.

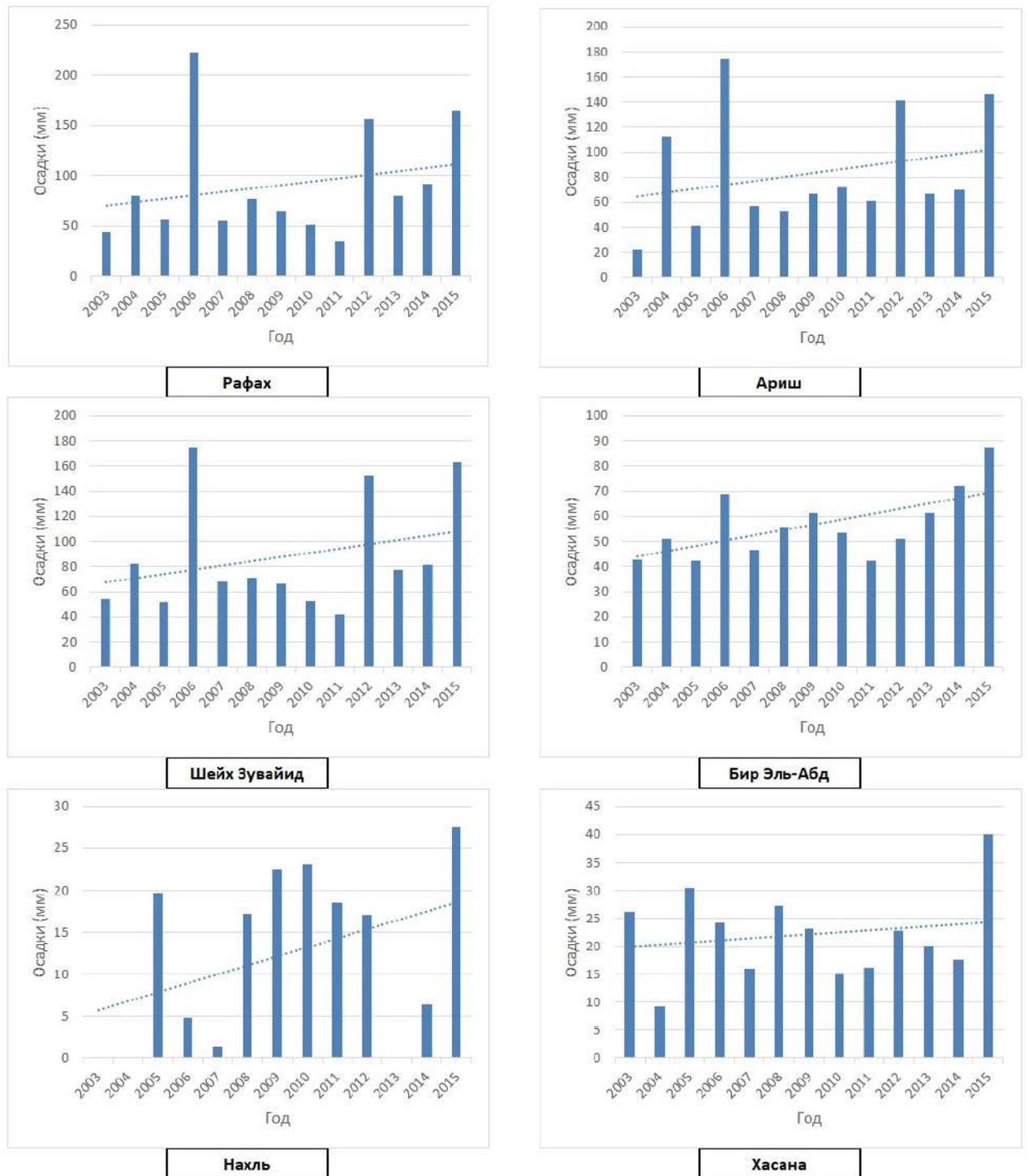


Рис. 2.5. Изменение среднегодового количества осадков в различных районах Северного Синая в течение 2003-2015 г.г

В целом в исследуемой зоне Северного Синая климат очень сухой, и восполнение подземных вод весьма ограничено, однако в последние годы наметилась тенденция к увеличению количества и интенсивности выпадения осадков в Северном Синае. Таким образом, появляются большие

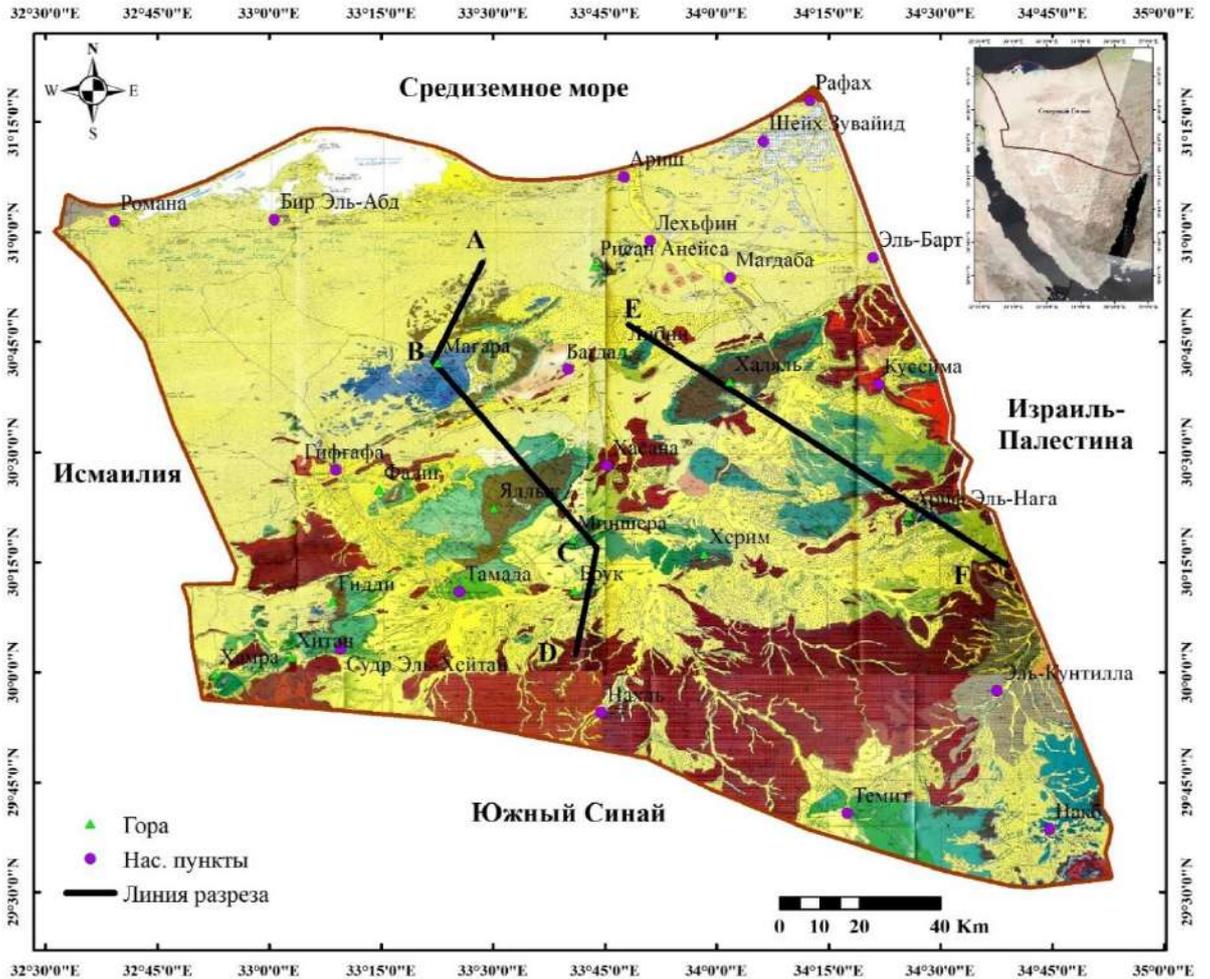
возможности сбора, хранения и использования этой воды в сельском хозяйстве или промышленном развитии Северного Синая.

### **2.3.Геологическое строение**

В геологическом отношении Синайский полуостров представляет собой часть Арабо-Нубийского массива, постепенно погружающегося на север, в сторону Средиземного моря. В геологическом разрезе присутствуют породы докембрийского фундамента, перекрытые отложениями кембро-ордовика, карбона, перми, триаса, юры, мела и палеогена. Завершают разрез четвертичные отложения (рис. 2.6, 2.7, 2.8).

На северном Синае изученная часть разреза ограничивается триасовыми известняками, нижележащие породы вскрыты только на центральном Синае. Прибрежная равнина Северного Синая представляет собой сброс большой амплитуды, и подошва триасовых отложений вскрыта на глубине более 2000 м [8].

Представленная ниже характеристика геологического строения Синайского полуострова составлена по совокупности результатов всех проведенных ранее на данной территории геологических исследований, в том числе и выполненных в последние годы [9; 12; 20; 23; 38; 47; 48; 67; 68; 77; и др.].



**Легенда**

**ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ**

- Qsd Песчаные дюны и покровы
- Qw Отложения вади
- Qp Пляжные отложения
- Qfa Фангломераты
- Qhc Alloвиальные отложения Хамада

**ТРЕТИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ**

- Toba Нижний плиоцен
- Tamaj Средний эоцен (Мокаттамия)
- Talaq Иперсиан (нижнеэоценовые-верхнеливийские)
- Tasa Палеоцен-нижний эоцен (нижнеливийские)

**МЕЛОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ**

- Ksd Маастрихт
- Kcu Кампан
- Kwt Турон
- Knt Сеноман
- Krz Альб
- Kml Альб-апг

**ЮРСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ**

- Jba Байос
- Jb1 Лейас (верхний лейас)
- Jb2 Формация Райабия (средний лейас)
- Jb3 Формация Машабба (нижний лейас)

**ТРИАСОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ**

- Tra Нижний карн-ладин
- Tra Анзий

**ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СИМВОЛЫ**

- Геологический контакт
- Нормальный разлом
- Антиклиналь, стрелкой показано направление погружения оси
- Синклиналь
- Простираение и падение слоев

Рис. 2.6. Геологическая схематическая карта Северного Синая



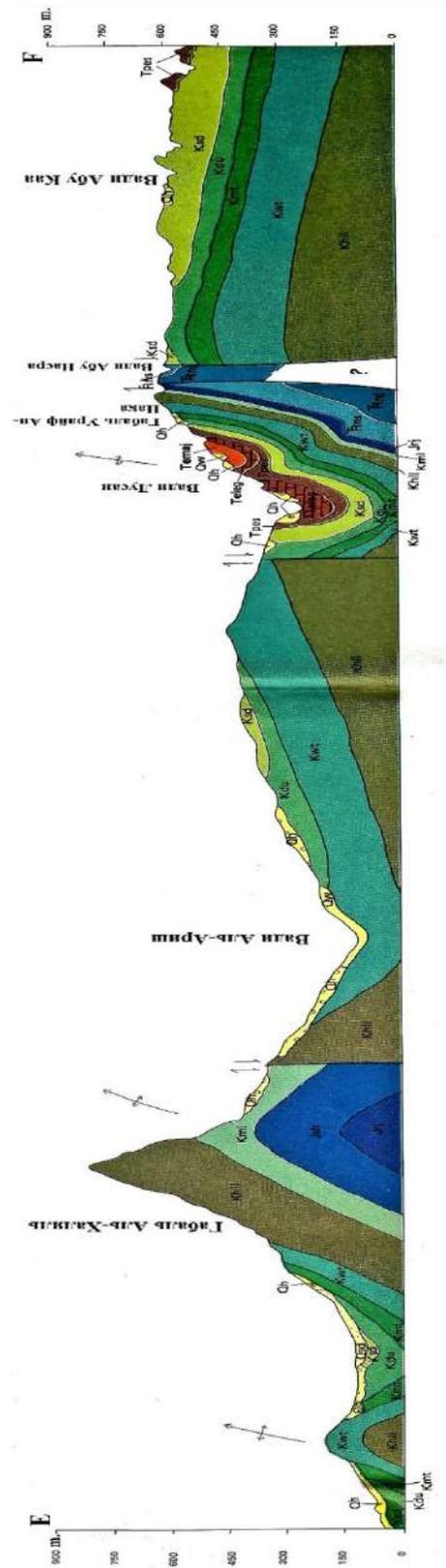


Рис.2.8. Геологический схематический разрез Северного Синая по линии EF (см. на рис. 2.6)

## **Мезозойская эратема**

### **Триасовая система**

Отложения триасовых пород были обнаружены только в районе купола в Гебель Ариф Эль-Нага, на юго-восточной границе Северного Синая (рис. 2.6 и 2.7) [34]. Триасовые отложения представлены в основном сланцами, известняками, песчаниками, доломитами, доломитовыми сланцами и конгломератами с прослоями аргиллитов и ангидритов мощностью до первых десятков метров.

### **Юрская система**

Отложения юрских формаций выходят на поверхность только в купольных структурах северной части Северного Синая: в Гебель Магара, Гебель Яллка, Гебель Ариф Эль-Нага и Гебель Эль-Гидди (рис. 2.6 и 2.8) [34]. Полный разрез юрских отложений в пределах Синайского полуострова, то есть от нижнего до верхнего отделов юры, обнаружен только в Гебель Магара. Общая мощность этих пластов достигает примерно 2000 м. Северный фланг данного купола относительно пологий, а на южном крыле фиксируется вертикальная структура, рассеченная надвиговым разломом.

Юрская формация представлена песчаниками и сланцами с редкими прослоями алевролитов и песчаного мергеля, а также известняками и угольными пластами [34].

### **Меловая система**

#### **Нижний отдел**

Породы нижнего мела в Северном Синае изменяются от песчаников до известняков (к северу от Гебель Магара - формация Рисан Анеиза) (рис. 2.6) [34; 60]. В большинстве разрезов преобладают пористые песчаники от средне- до крупнозернистых [34; 60]; иногда наблюдаются прослойки водоупорных сланцев [34]. Имеются участки, где наблюдаются выходы

пород нижнего мела, – Гебель Магара, Гебель Халяль, Гебель Фалиг, Гебель Миншера, Гебель Херим, Гебель Гидди, и Гебель Ариф Эль-Нага. Обычно наблюдается наклонное залегание пластов (рис. 2.7 и 2.8) [34]. Мощность - в диапазоне 200-300 м [53].

### **Верхний отдел**

Верхний мел на Синайском полуострове представлен сеноманским и туронским ярусами и сенонским надярусом [34; 60]. Сеноманские отложения согласно перекрывает нижнемеловые отложения и также согласно перекрыты породами туронского яруса. Иногда часть или весь верхнетуронско-коньякский разрез отсутствует из-за размыва, и чаще всего отложения сенона несогласно перекрывают туронские отложения.

Отложения сеноманского яруса в самой нижней части представлены известняками и известковыми песчаниками, переходя выше в известняки, доломитовые известняки и доломиты. Довольно мощные сеноманские породы встречаются в основном на следующих участках: Гебель Миншера (мощность 575 м), Гебель Магара (550 м), Гебель Хамра (550 м), Вади-эль-Гидди (545 м) и Гебель Халяль (535 м). Мощность сеномана мала в районах Гебель Еллеке, Фалиге, Хериме и Ариф Эль-Наге. Здесь сеноман представлен преобладанием доломитов и доломитовых известняков и различных фаций, состоящих из известковых песчаников, сланцев и известняков [100].

Туронские отложения состоят преимущественно из известняков, доломитовых известняков и меловых известняков. Рыхлые отложения песчаников появляются обычно в основании формации. В районе Гебель Халяль отложения турона состоят в основном из фораминиферовых известняков, но содержат также и некоторое количество включений серо-зеленого сланца. Породы турона либо частично, либо полностью размывы на многих участках: в Гебель Магаре, Гебель Ариф Эль-Наге и Накбе.

Средняя мощность туронских отложений отмечается в областях Гебель Фалиг, Еллек и Херим, где она составляет от 70 до 85 м. Наиболее мощные слои турона присутствуют в районах Гебель Халяль, Гебель Либни, Гебель Миншера, Эль-Брук, и Гебель Гидди. Мощность турона в этих районах от 100 м до 270 м, максимальная мощность наблюдается в районах Гебель Либни и Гебель Гидди.

Сенонские отложения в Северном Синае состоят обычно из однородной последовательности, представленной мелом. Максимальная мощность сенона наблюдается в районе Гебель Миншера (270 м). Здесь основание сенона представлено сланцами мощностью 90 м; сланцы мощностью до 20 м появляются и в основании разреза верхнего сенона и перекрываются толщей мела и мелового известняка мощностью 180 м.

### **Кайнозойская эратема**

#### **Палеогеновая система**

##### **Палеоценовый отдел**

Породы палеоцена в Северном Синае представлены формацией Эсна, состоящей из сланцев и мергелей [34; 60]. Относительно глубокое море покрывало Синай в результате трансгрессии в конце верхнего мела – начале палеоцена. Поэтому формация Эсна отлагалась в понижениях между основными структурными максимумами на отложениях верхнего мела. Формация Эсна перекрывается известняками эоценового яруса. Обычно мощность эоценовых отложений в Северном Синае варьирует от 30 м до 65 м, но, например, в районе Гебель Магара их мощность составляет всего около одного метра, а часто эоценовые породы и вовсе отсутствуют. Формация Эсна обнажается на крутых склонах или скалах. Это часто наблюдается в областях к западу от районов Халяль, Кусеима, Ариф Эль-Нага и Эль-Кунтилла. Формация Эсна представлена сланцами или мергелями, а также чередованием сланцев и мергелей (в районе Аин-

Гудеират на востоке Кусеима). Хотя формация Эсна рассечена большим количеством разломов, слои в этой области, как правило, субгоризонтальные, и складчатость проявлена незначительно. Предполагается, что интенсивных тектонических движений после отложения формации не происходило.

### **Эоценовый отдел**

Отложения эоцена согласно залегают на формации Эсна и обычно образуют единую толщу. Эоценовые породы представлены формацией Эгма, которая состоит преимущественно из известняков и доломитовых известняков [34; 60]. Известняки эоцена делятся на две группы – нижнего эоцена и среднего-верхнего эоцена. Нижнеэоценовые известняки на севере Синая распространены в широких синклиналиях. Они имеют практически одинаковый литологический состав. Их мощность варьирует от очень малой (метры) до полного отсутствия. Разрез среднего-верхнего эоцена в северной и центральной частях Синая характеризуется крупными несогласиями; части этого разреза отсутствуют на некоторых участках.

### **Четвертичная система**

Мощность четвертичных отложений обычно от 80 до 100 м. Стратиграфия четвертичных отложений в исследуемой области схематична (рис. 2.6) [34; 60]. Четвертичные формации представлены в основном следующими группами отложений: «песчаными дюнами», «древними пляжными песками», «гравием» и «куркаром».

«Куркар» — это местное название известкового песчаника, который уплотнялся после отложения. Куркар отлагался в мелководной морской среде и поэтому распространен в пределах прибрежной равнины.

«Древние пляжные пески» в основном состоят из песка (слабосцементированного песчаника), от тонко- до грубозернистого с включениями гравия и глинистых слоев. Этот слой имеет мощность

примерно от 20 м до 60 м. На некоторых участках они согласно перекрывают отложения куркара, образуя единый с ними грунтовый водоносный горизонт. Контакт с вышележащими отложениями песчаных дюн часто трудно различим.

«Песчаные дюны» широко распространены в прибрежной равнине, обычно перекрывая древние пляжные пески, с локальными включениями глинистых и гравийных слоев. В некоторых случаях песчаные дюны залегают на слабопроницаемых глинистых отложениях, являющихся водоупором для локально развитых в дюнах водоносных горизонтов. Мощность песчаных дюн составляет в большинстве случаев от 20 м до 30 м.

«Гравий» обнаружен только в нижнем течении Вади Эль-Ариш, содержит локальные включения песчаных и глинистых прослоев. Мощность слоя – от 20 м до 60 м. Данные отложения перекрывают куркар (на локальных участках), образуя единый с ним грунтовый водоносный горизонт.

### **ГЛАВА 3. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОГО СИНАЯ ПО ЗНАЧЕНИЯМ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОРОД**

#### **3.1. Гидрогеологические условия Северного Синая**

Гидрогеологические условия Северного Синая охарактеризованы по совокупности результатов всех проведенных ранее на данной территории гидрогеологических исследований, в том числе и выполненных в последние годы [14; 24; 25; 42; 43; 45; 52; 55; 63; 89; и др.]. Основой фактологической базой исследований являлась информация по гидрогеологическим скважинам, содержащаяся в обобщающем отчете “North Sinai Groundwater Resources Study in the Arab Republic of Egypt” [60], а также дополнительно предоставленная Институтом водных исследований (WRI) при Министерстве ирригации и водных ресурсов Арабской Республики Египет [7]. В рамках настоящей работы проведено обновление информации по всем существующим гидрогеологическим скважинам в районе Северного Синая. Результатом этой систематизации стала соответствующая база данных, в которую в совокупности включены материалы по 180 скважинам [31; 34; 71; 72; 73; 101; и др.].

В гидрогеологическом отношении на изучаемой территории выделяется зона распространения коренных осадочных пород и прибрежная зона, где развиты водоносные четвертичные отложения большой мощности [56].

#### Водоносные горизонты четвертичных отложений

Отложения четвертичной формации широко распространены в исследуемой области. Тем не менее, распространение в них водоносных горизонтов значимой мощности ограничено только прибрежной равниной вдоль Средиземного моря. Относительно мощные четвертичные отложения

протягиваются вдоль прибрежной равнины полосой шириной 10 до 15 км от устьевой части вадии Эль-Ариш до района Рафаха (рис. 3.1), а от Бир-Эль-Абда до Романа – полосой шириной около 10 км.

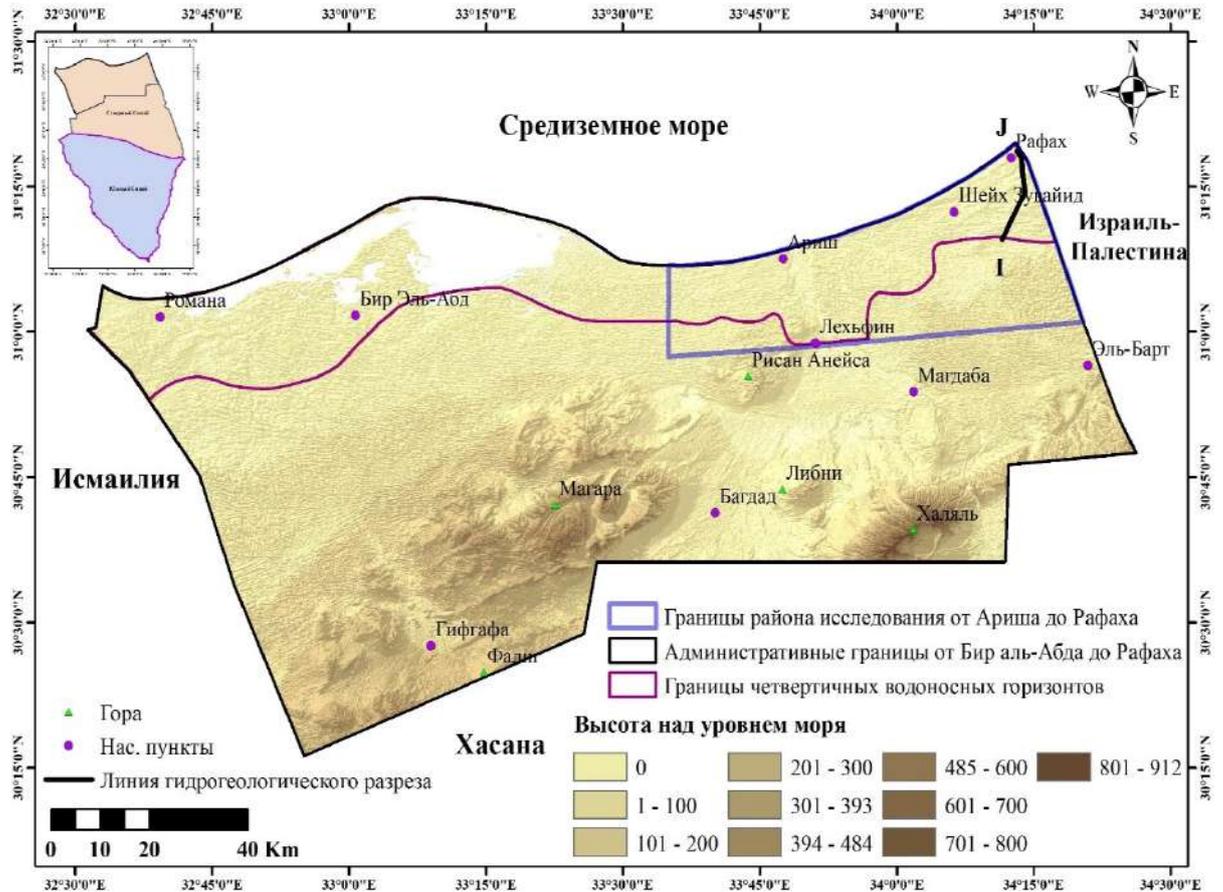


Рис. 3.1. Северная зона Северного Синая в пределах развития четвертичных отложений

Северный Синай делится на зону распространения коренных осадочных пород и прибрежную зону, где развиты водоносные четвертичные отложения большой мощности. Основными водовмещающими породами в горизонтах четвертичного возраста являются песок, гравий и отложения куркара (рис. 3.2).

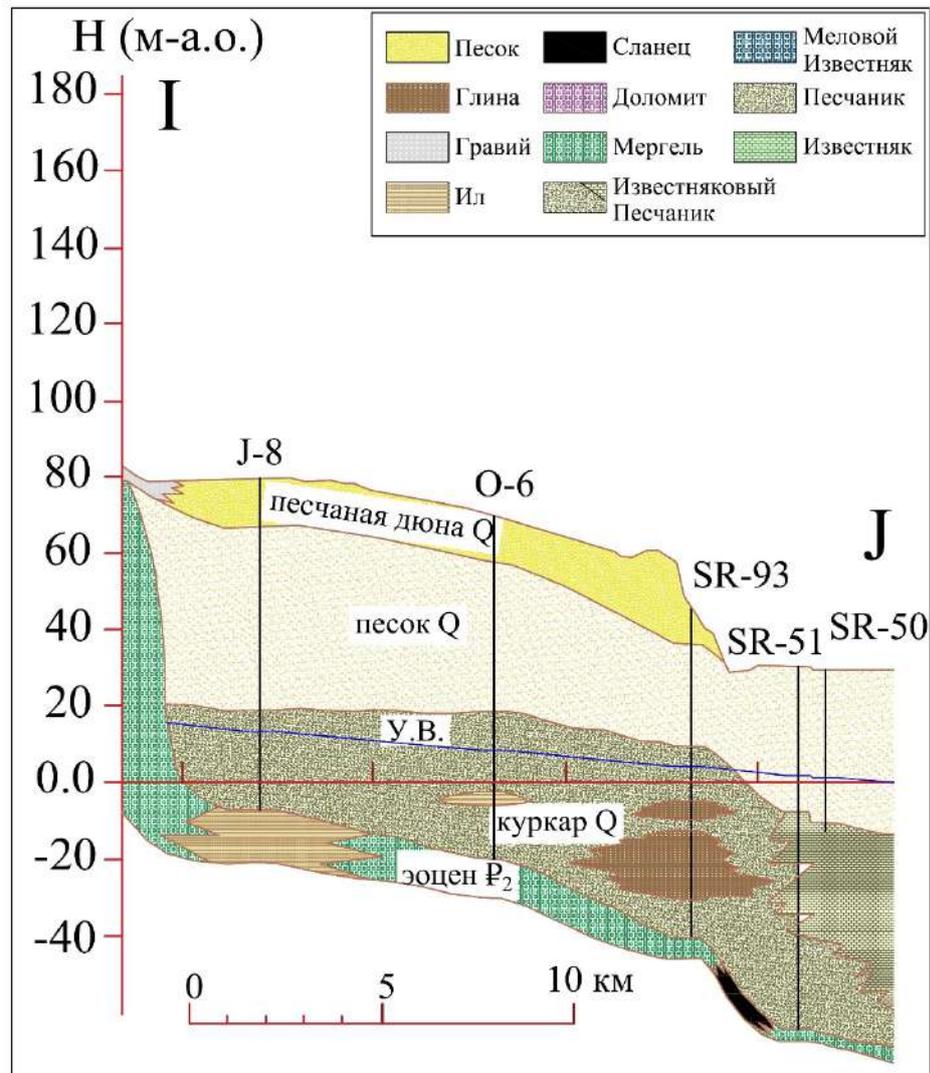


Рис. 3.2. Гидрогеологический разрез в пределах развития четвертичных отложений

Как видно на рисунке 3.3, в пределах указанной полосы суммарная мощность четвертичных отложений изменяется в довольно большом диапазоне, увеличиваясь от первых метров на южной границе указанной полосы до 80–100 метров на севере. В целом наблюдается следующая тенденция: мощность четвертичного покрова к западу от вади Эль-Ариш является меньшей по сравнению с таковой к востоку от вади Эль-Ариш.

Основными водовмещающими породами четвертичных отложений в рассматриваемой области являются песок, гравий и отложения куркара - известкового песка, практически повсеместно распространенные в прибрежной равнине.

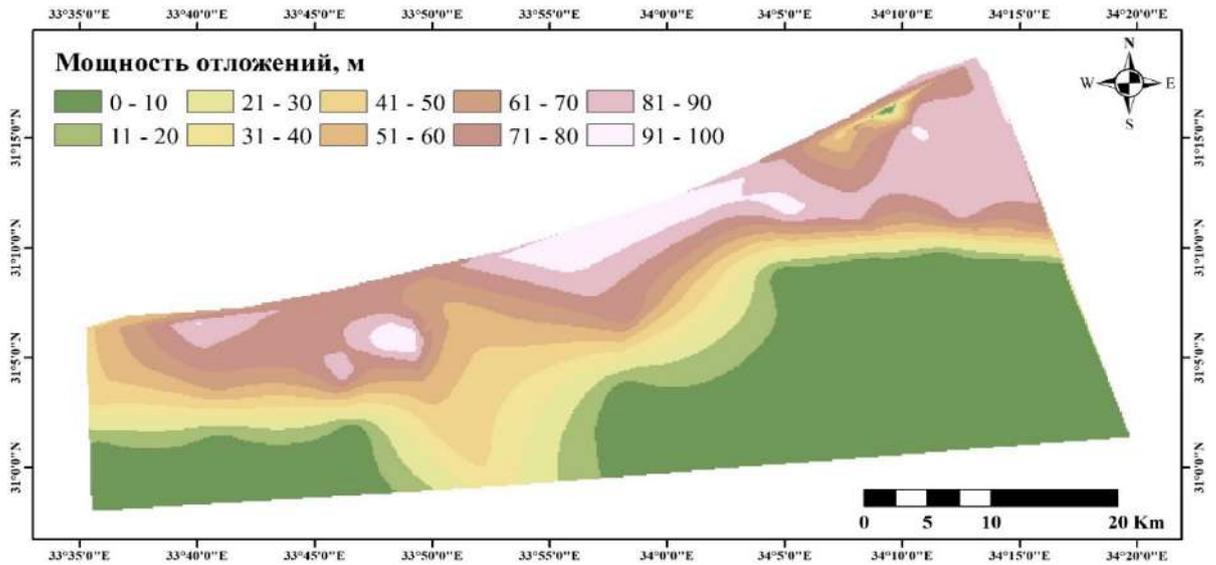


Рис. 3.3. Карта изолиний мощности (суммарной мощности) четвертичных отложений

Как правило, в прибрежной зоне верхний слой представлен песком мощностью от 20 до 40 м, состоящим из отложений песчаных дюн и древних пляжных песков. Дифференциация этих формаций в литологическом профиле скважин довольно сложна. При этом древние пляжные пески, перекрытые песками дюн, обычно считаются одним из перспективных водоносных горизонтов. Песчаный пласт подстилается гравием или отложениями куркара. Распределение мощности песка в долине вади Эль-Ариш и прибрежной равнине в целом от Шейх Зувайида до Рафаха показано на рисунке 3.4.

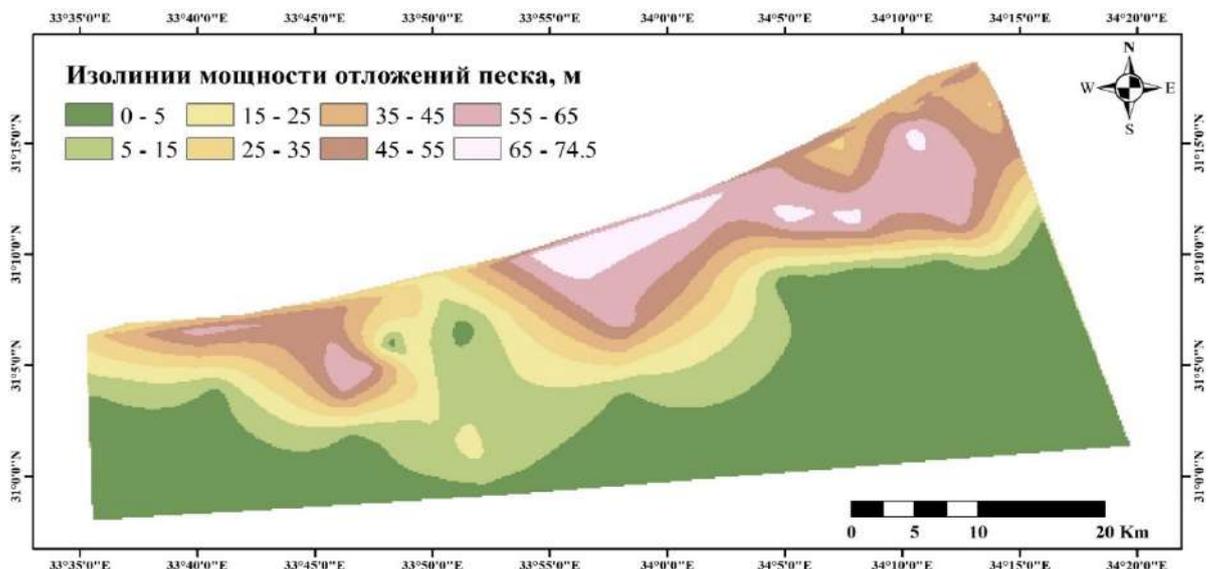


Рис. 3.4. Карта изолиний мощности отложений, представленных песками

Отложения гравия залегают на многих участках рассматриваемой области, но в виде самостоятельного водоносного горизонта этот пласт сосредоточен преимущественно в аллювиальной долине в районе вадии Эль-Ариш: он простирается примерно на 10 км вдоль русла вадии Эль-Ариш. Происхождение этого гравия дискуссионно. Тем не менее, очевидно, что он выходит за пределы современной аллювиальной долины вадии Эль-Ариш. Распределение мощности гравийного водоносного горизонта показано на рисунке 3.5.

В прибрежной равнине в целом, от Шейх Зувайида до Рафаха, гравийные слои наблюдаются только на локальных участках. Очевидно, это местные отложения, накопившиеся в древних вадиях. В большинстве случаев здесь отмечается, что уровни подземных вод в скважинах устанавливаются ниже подошвы гравия. По этой причине водообильность гравия здесь считается низкой.

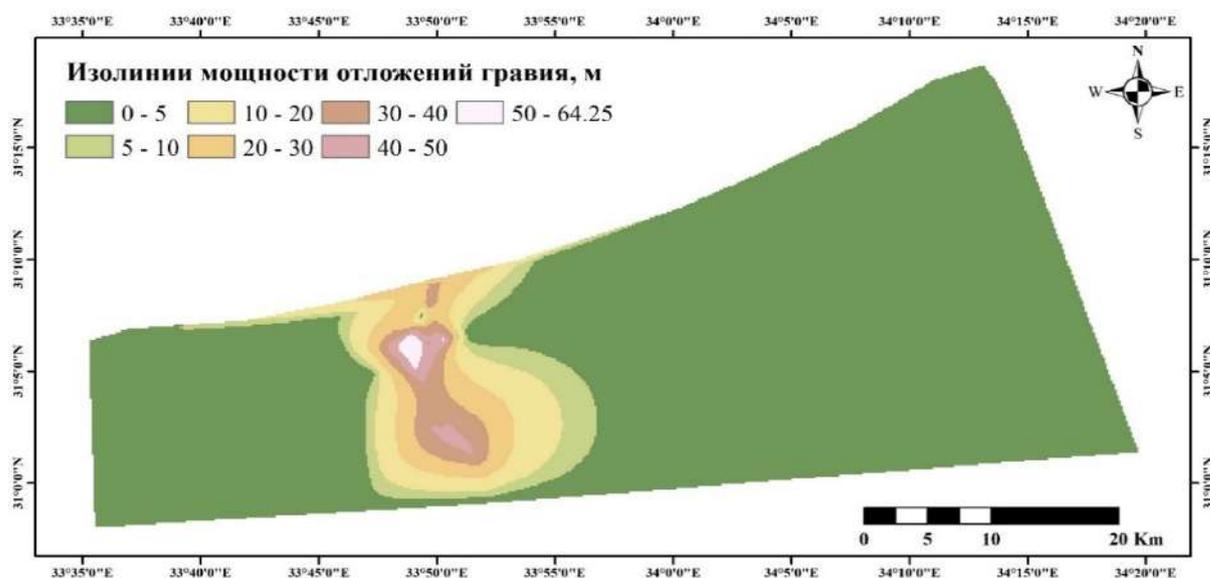


Рис. 3.5. Карта изолиний мощности отложений, представленных гравием

Отложения куркара широко развиты в пределах прибрежной равнины, в зоне от Шейх Зувайида до Рафаха, под отложениями песчаных дюн. Абсолютная отметка подошвы отложений куркара колеблется от -60 до -20 м. Его мощность варьирует от 10 до 40 м. В некоторых частях прибрежной

зоны песчаных дюн куркар выклинивается. Распределение мощности данных отложений показано на рисунке 3.6.

В скважинах аллювиальной долины вади Эль-Ариш куркар прослеживается на 10 км вдоль русла вади и перекрыт гравием. В этой зоне фильтры большинства скважин установлены именно на отложения куркара.

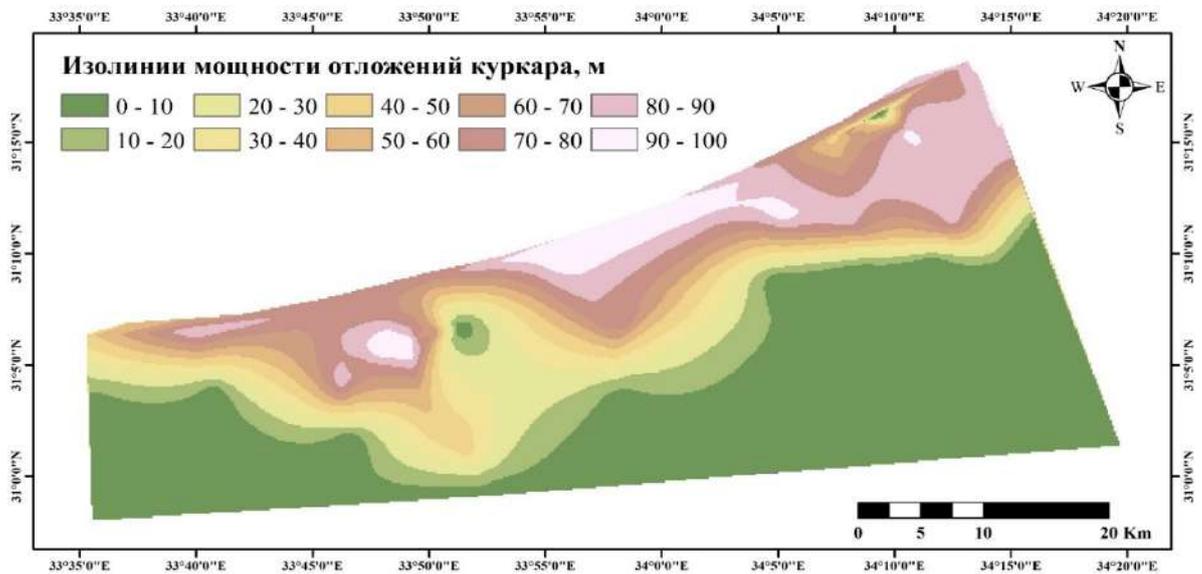


Рис. 3.6. Карта изолиний мощности отложений, представленных куркаром

### Водоносные горизонты дочетвертичных отложений

Литологический состав, область распространения и условия залегания дочетвертичных отложений описаны в главе 2. Дочетвертичные отложения широко распространены на исследуемой территории, однако распространение в них водоносных горизонтов значительной мощности ограничено областью, показанной на рис. 3.7.

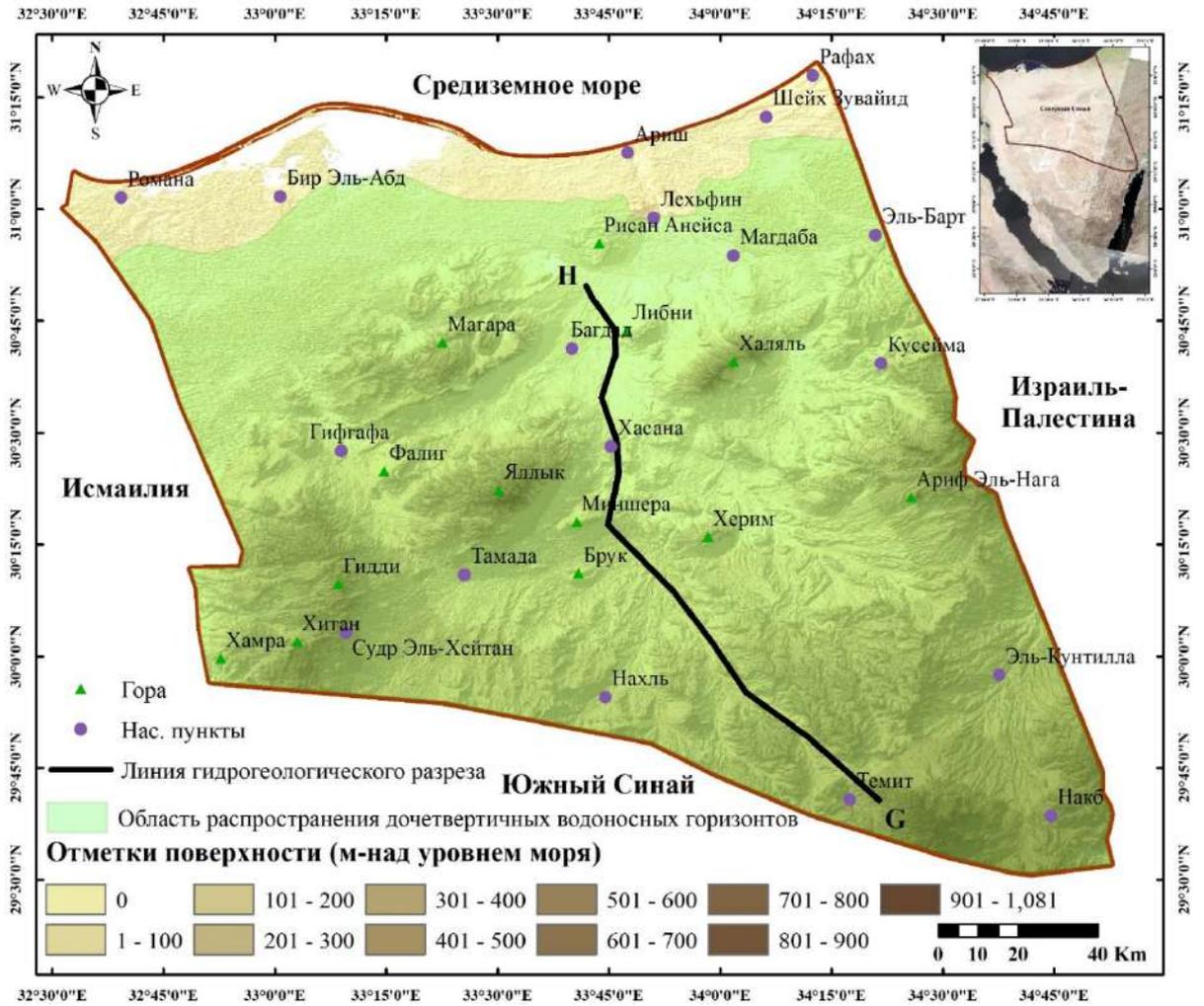


Рис. 3.7. Развитие дочетвертичных водоносных горизонтов в пределах северного Синая

В дочетвертичных отложениях основные водоносные горизонты приурочены в основном к известнякам палеогена-верхнего мела, и песчаникам нижнего мела (рис. 3.8).

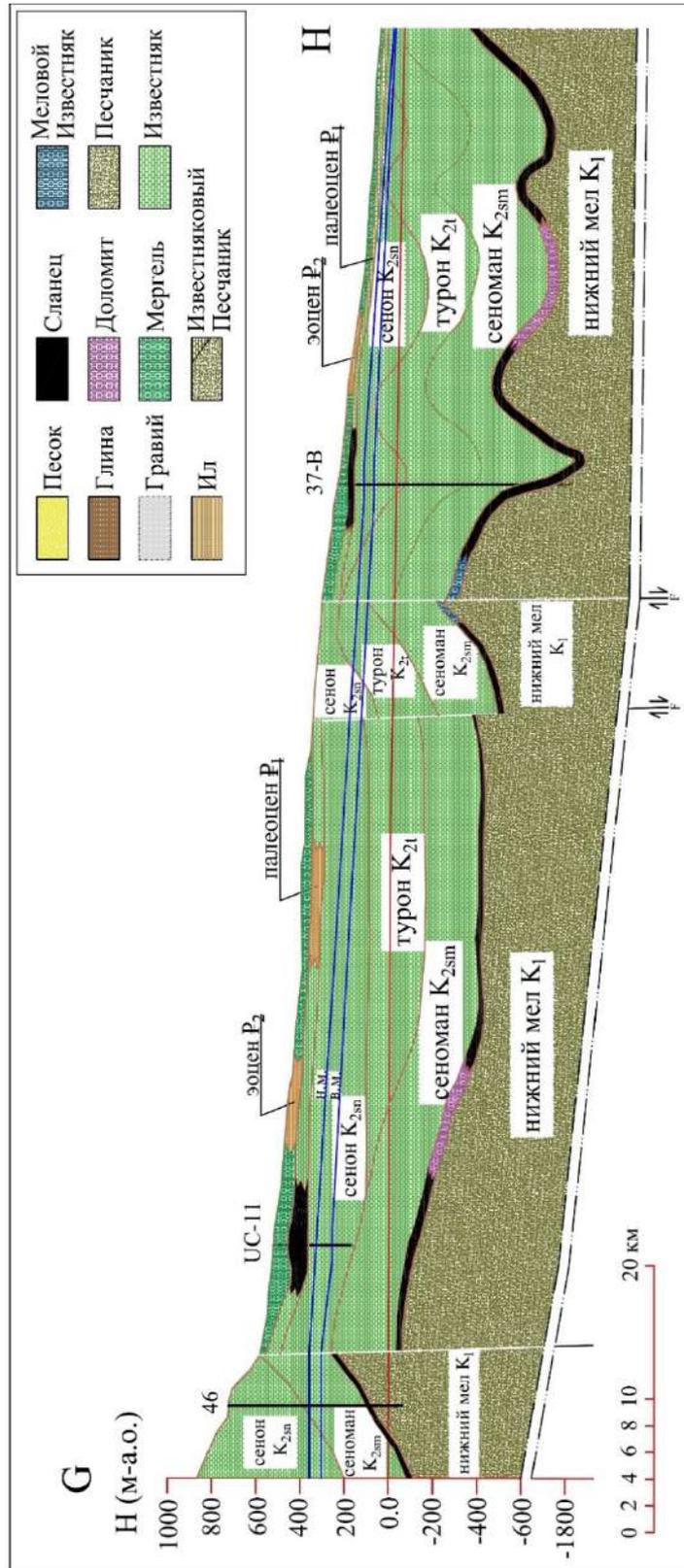


Рис. 3.8. Гидрогеологический разрез в пределах развития дочетвертичных отложений

## Палеоген

### Эоцен

Водоносные горизонты в эоцене развиты преимущественно в известняках. Водопроницаемость присутствующих в эоцене слоев мергеля очень низка, и их следует рассматривать как водоупорные. Характерной особенностью залегания подземных вод в водоносном горизонте известняков является то, что они заключены в базальной части известняка, подстилаемого породами палеоценовой формации Эсна. Видимо, поэтому, несмотря на то что эоцен не перекрыт никакими другими отложениями, кроме отложений вади, подземные воды напорные. Вероятно, верхняя часть нетрещиноватого известняка совместно со слоями мергеля играют роль водоупора, создающего напорные условия. Пористость известняка сама по себе не очень высока, и основные запасы подземных вод находятся в трещинах, развитых в известняке. Мощность водоносных известняков эоцена достигает 100 и более метров, глубины залегания показаны на рисунке 3.9.

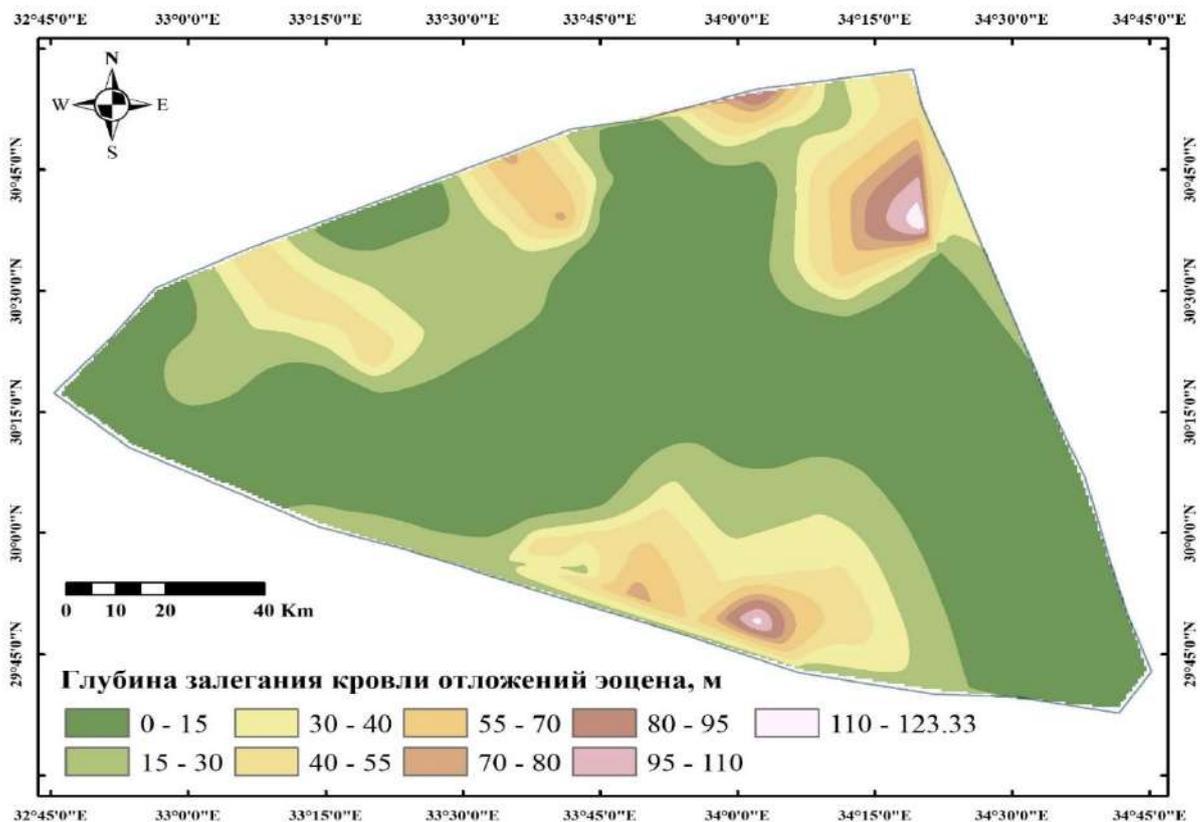


Рис. 3.9. Карта глубин залегания отложений эоцена

### Палеоцен

Отложения палеоцена в Северном Синае, как уже указывалось в главе 2, представлены формацией Эсна и состоят в основном из сланцев с редкими мергелями, что позволяет определить данный горизонт как относительно водоупорный. Суммарная мощность этих сланцев и мергелей колеблется от первых метров до десятков и даже сотни метров. Глубины залегания показаны на рис. 3.10. Сланец часто играет роль водоупорной подошвы водоносного известняка эоцена.

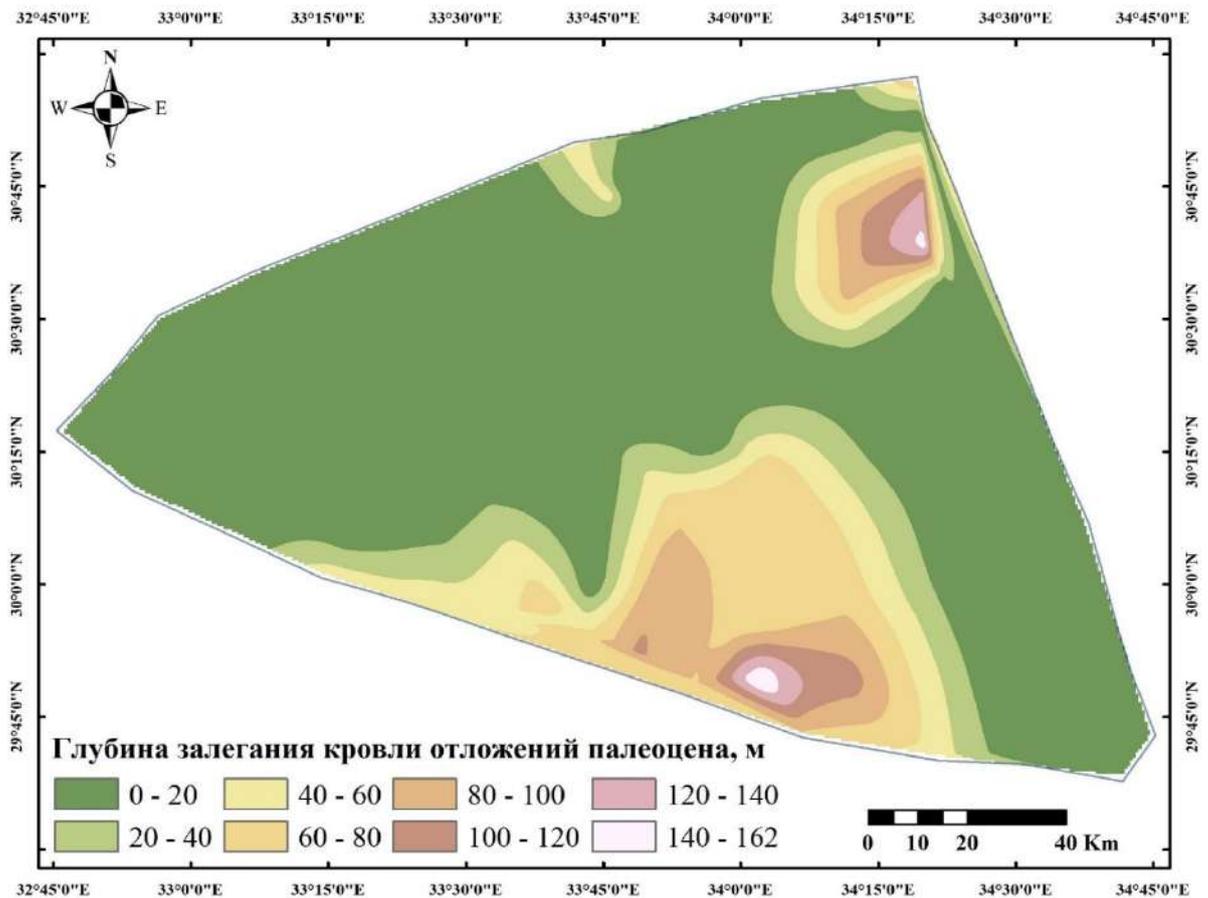


Рис. 3.10. Карта глубин залегания отложений палеоцена

### Верхний мел

#### Сенон

Сенон широко распространен в исследуемой области. Верхняя часть сенона представлена мелом с известняками, а нижняя часть - известняками и сланцами. Водоносные горизонты развиты в известняках как верхнего, так и нижнего сенона. Подземные воды залегают и в преимущественно

пористых, и в преимущественно трещиноватых частях известняка. Мергель и сланцы слабопроницаемы и образуют относительно водоупорные слои. Несколько пластов известняка, разделенных прослоями сланцев или мергелей, очевидно, образуют водоносный комплекс. Карта глубин залегания водоносного комплекса сенона представлена на рисунке 3.11.

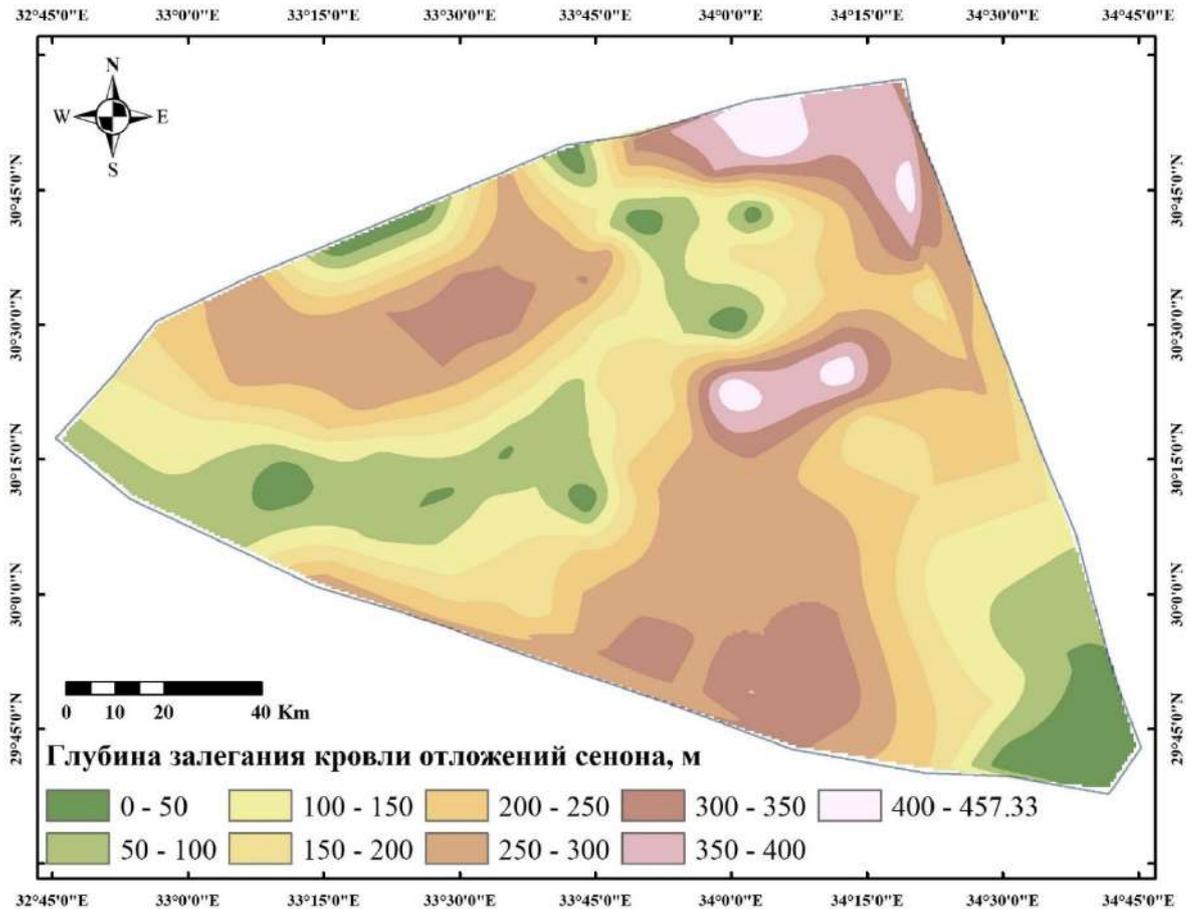


Рис. 3.11. Карта глубин залегания отложений сенона

### Турон

Турон представлен преимущественно известняком со сланцами в основании. Водоносные горизонты развиты, так же, как и в предыдущих случаях, преимущественно в известняке – наиболее активно в районах Хасана и Накаб. Карта глубин залегания отложений турона представлена на рисунке 3.12.

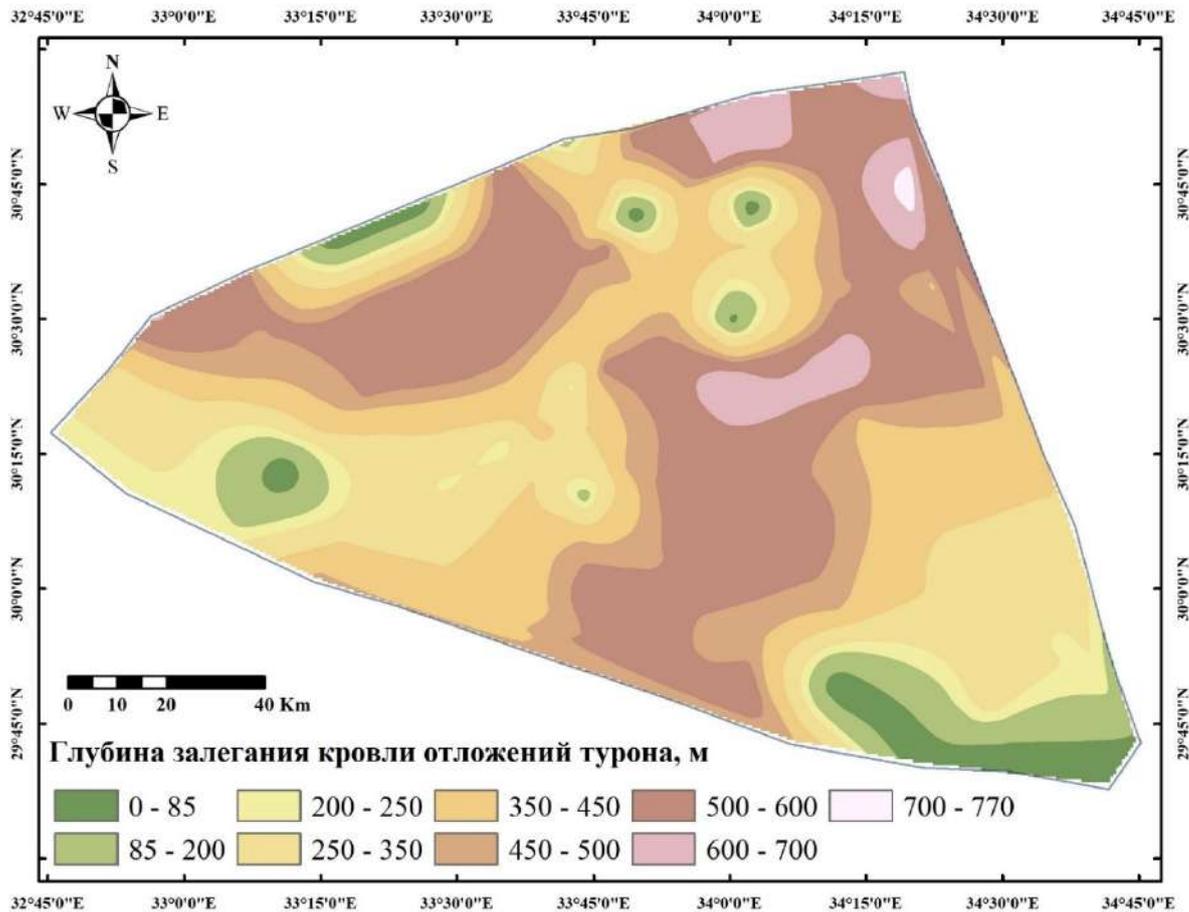


Рис. 3.12. Карта глубин залегания отложений турона

### Сеноман

Породы основания сеномана, перекрывающего нижний мел, представлены водоносным известковым песчаником. Верхняя часть сеномана представлена также водоносными известняками и доломитовыми известняками, а кроме того, доломитами. Сеноманские породы обнажаются только на куполах, на остальной площади распространения оказываются перекрытыми другими породами.

Локально в сеноманских известняках зафиксированы карстовые пещеры, что по определению означает их чрезвычайно высокую проницаемость в этих узлокальных зонах. Отложения известкового типа в нижней части содержат прослой сланцев. Эти сланцы, включенные обычно в доломитовые фации, имеют сплошное распространение и

мощность порядка 20 м, и являются относительным водоупором. Карта глубин залегания отложений сеномана представлена на рисунке 3.13.

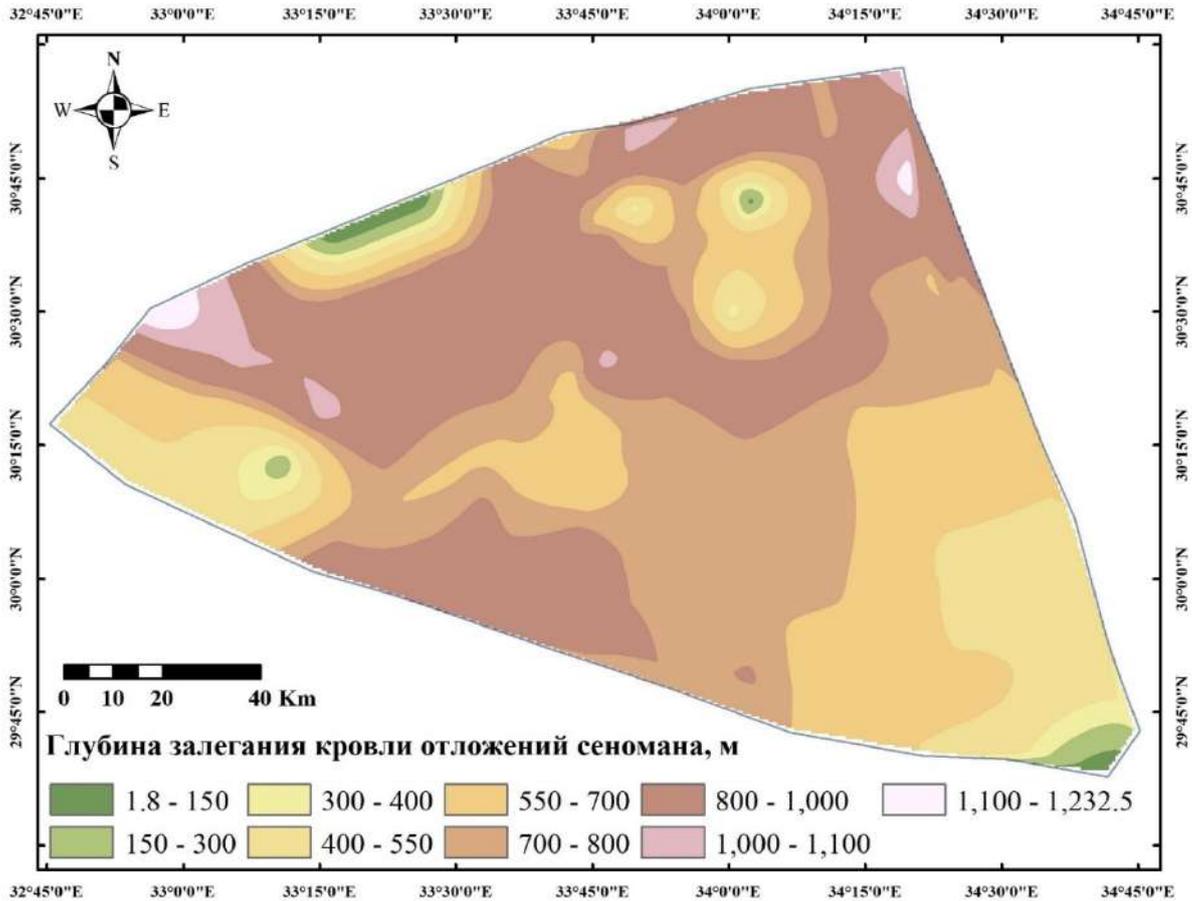


Рис. 3.13. Карта глубин залегания отложений сеномана

### Нижний мел

Нижнемеловые отложения распространены на большей части северного Синая. Породы нижнего мела представлены водопроницаемыми кварцевыми (нубийскими) песчаниками или сменяющими их по литорали в северном направлении известняками. В разрезе песчаников присутствуют прослойки сланцев различной мощности в различных районах Северного Синая (преимущественно в северных). Глубина до нижнего мела варьирует по площади и превышает в большинстве точек 1000 м (рис. 3.14).

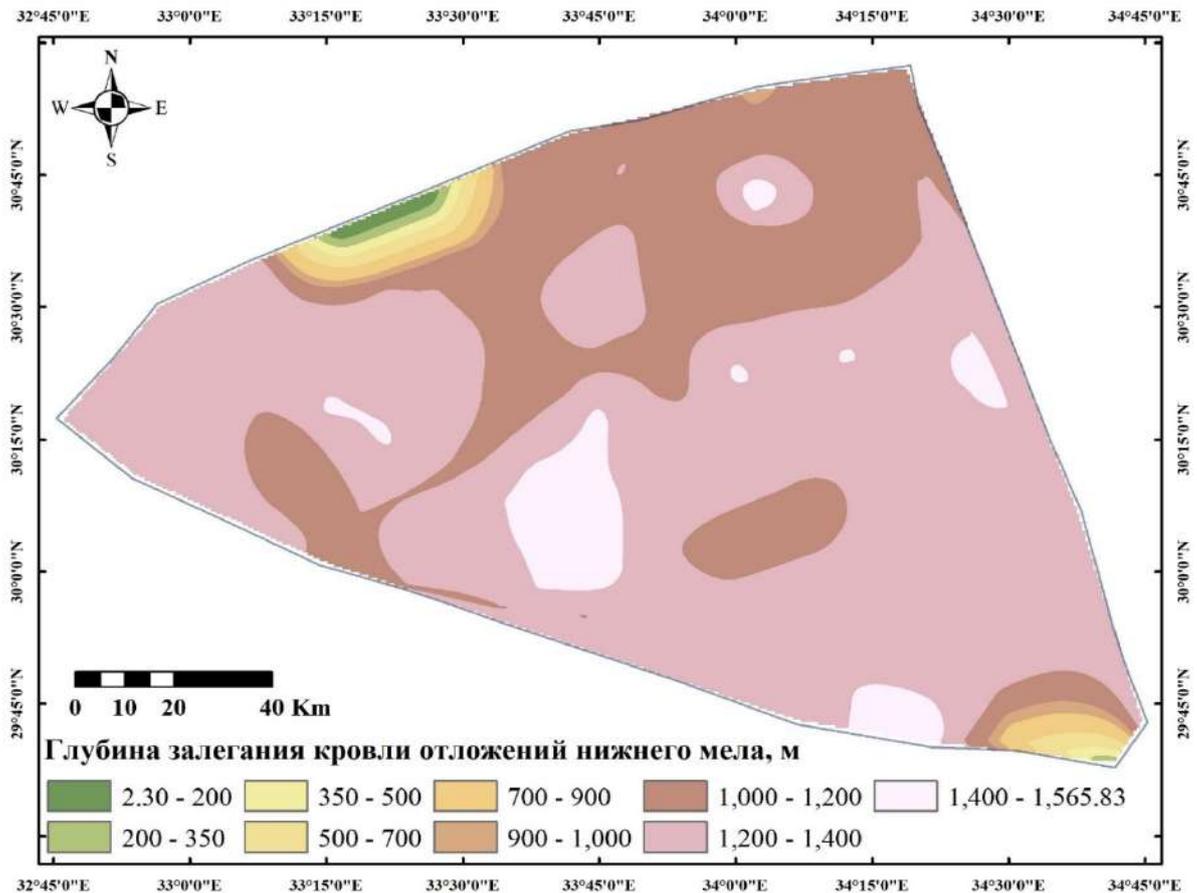


Рис. 3.14. Карта глубин залегания отложений нижнего мела

В районах, где песчаник нижнемелового возраста несогласно перекрывает юрские песчаники, водоупорной гидрогеологической границы между этими двумя образованиями нет.

### Юра

Средне- и нижнеюрские формации представлены водоносными песчаниками и относительно водоупорными сланцами с прослоями тонких угольных пластов. В одной из угольных шахт найдена каменная соль. Верхнеюрские образования представлены преимущественно известняками, развитыми обычно в купольных структурах.

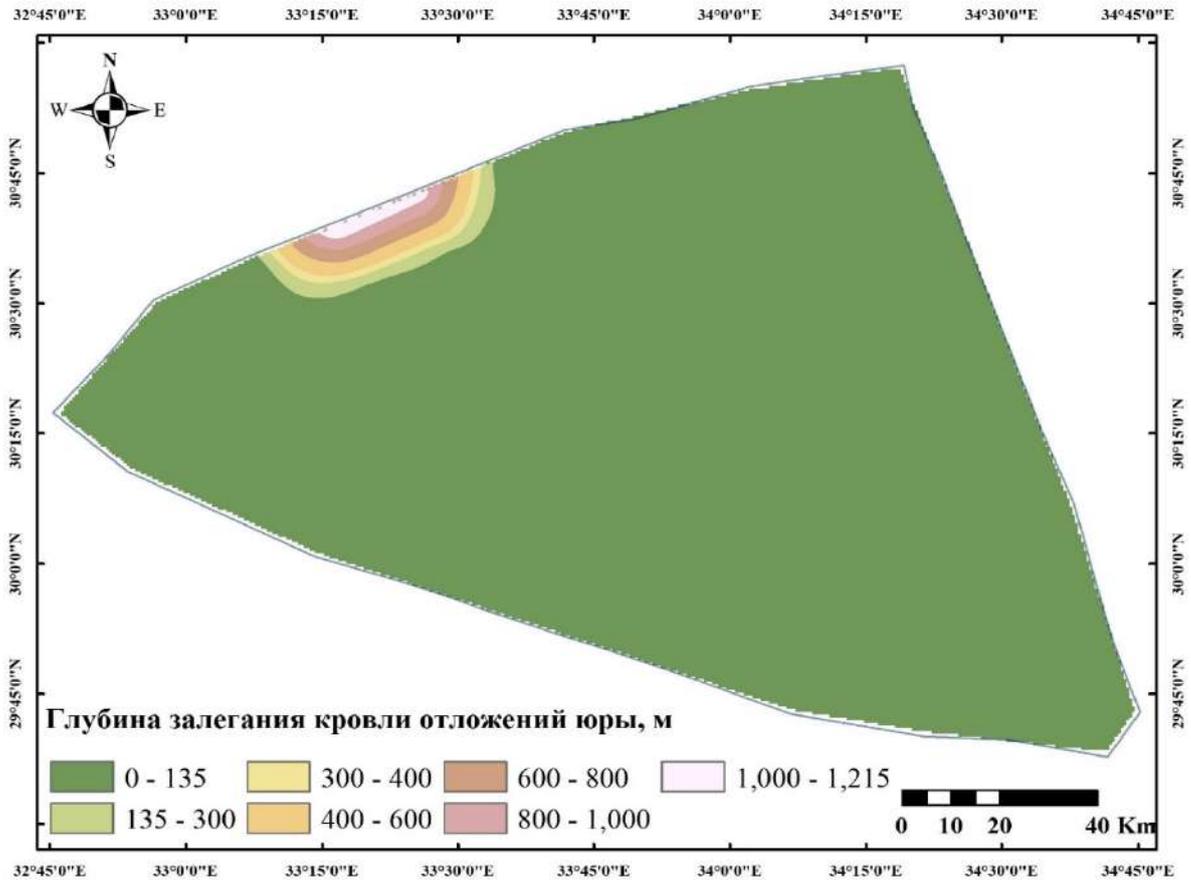


Рис. 3.15. Карта изолиний мощности юрских отложений

Скважины, вскрывающие водоносные горизонты юрских отложений, присутствуют только в области Гебель Магхара (рис. 3.15), распределенные вдоль северной окраины купола Магхара. Дебит этих скважин колеблется от 5 до 35 м<sup>3</sup>/ч (120-840 м<sup>3</sup>/сут). Предполагается, что область питания подземных вод верхнеюрской формации находится на северной окраине купола. Скважины, вскрывшие водоносный горизонт песчаников средне-нижнеюрской формации, имеют дебиты в диапазоне между 3,8 и 5,8 м<sup>3</sup>/ч (91,2 – 139,2 м<sup>3</sup>/сут), но в настоящее время считается, что горизонт не является перспективным ни с точки зрения количества, ни качества подземных вод, поэтому в работе не рассматривается.

### **3.2. Районирование Северного Синая по фильтрационным свойствам водовмещающих пород**

В данной главе представлены составленные автором ГИС-карты развития различных водоносных горизонтов, рассмотрены результаты статистического анализа значений фильтрационных параметров горных пород, а также результаты районирования территории Северного Синая в соответствии со значениями коэффициента фильтрации. Все эти оценки и построения были выполнены в соответствии с возрастом и литологическим составом водовмещающих пород (для четвертичных отложений, верхнемеловых-палеогеновых известняков и нижнемеловых песчаников).

В настоящем исследовании с помощью программы SPSS были выполнены статистические оценки для распределения значений коэффициента фильтрации  $K$  (м/сут), полученного в результате полевых опробований скважин.

#### Четвертичные отложения

Для четвертичных отложений были рассмотрены различные выборки данных в зависимости от опробованных водоносных горизонтов и районов опробования: 1) генеральная совокупность для всех четвертичных отложений (Qобщ); 2) совместное опробование (единый фильтр) отложений гравия и куркара – в долине вади Эль-Ариш (куркар+гравий\_А); 3) отложения куркара на северо-восточном побережье области исследования, в районах Эль-Ариш, Шейх Зувайид и Рафах (куркар\_АШР); 4) песчаные отложения на северо-восточном побережье области исследования в тех же районах Эль-Ариш, Шейх Зувайид и Рафах (песок\_АШР); 5) песчаные отложения в северо-западной области Бир-эль-Абд (песок\_БрЭА). Результаты расчета статистических параметров приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1- Статистические параметры распределения значений коэффициента фильтрации (К, м/сут) в различных водоносных горизонтах четвертичных отложений

Показатель	Общ.	куркар+гравий _А	куркар_АШР	песок_АШР	песок_БрЭА
N - число измерений	52	31	11	6	4
Среднее	118	120	75	45	327
Медиана	92	102	77	37	361
Станд. откл.	106	91	54	19	149
Минимум	2,7	21	2,7	29	131
Максимум	457	360	177	77	457

Как видно из таблицы 3.1, по результатам опробования 52 скважин все четвертичные отложения характеризуются весьма высокими значениями коэффициентов фильтрации, составляющими в среднем десятки и даже сотни м/сут при абсолютном единичном минимуме 2,7 м/сут (куркар).

При этом отложения куркара и гравия характеризуются весьма большим разбросом величины коэффициента фильтрации: минимальные и максимальные значения отличаются в десятки (практически до сотни) раз. Вероятнее всего, это обусловлено различной степенью цементации данных пород на различных участках опробования.

Напротив, отложения песков представляются более однородными с фильтрационной точки зрения: минимальные коэффициенты фильтрации отличаются от максимальных всего в 2,5–3,5 раза. Но при этом среднее значение коэффициента фильтрации песков к западу от вади Эль-Ариш (в области Бир-эль-Абд) является вообще самым высоким из всех опробованных фаций четвертичных отложений (327 м/сут) и приблизительно в 7 раз больше, чем в песках восточной зоны, в районах Эль-Ариш, Шейх Зувайид и Рафах. Выводы, сделанные относительно

песков, на сегодняшний день следует считать условными, требующими дальнейших уточнений, из-за весьма малого количества их опробований.

На рисунках 3.16–3.20 представлены графики корреляционных зависимостей между коэффициентом фильтрации ( $K$ ) и глубиной опробованной скважины ( $ds$ ) как для всех скважин, оборудованных на четвертичные отложения, так и для указанных выше различных выборок данных в зависимости от опробованных водоносных горизонтов и районов опробования.

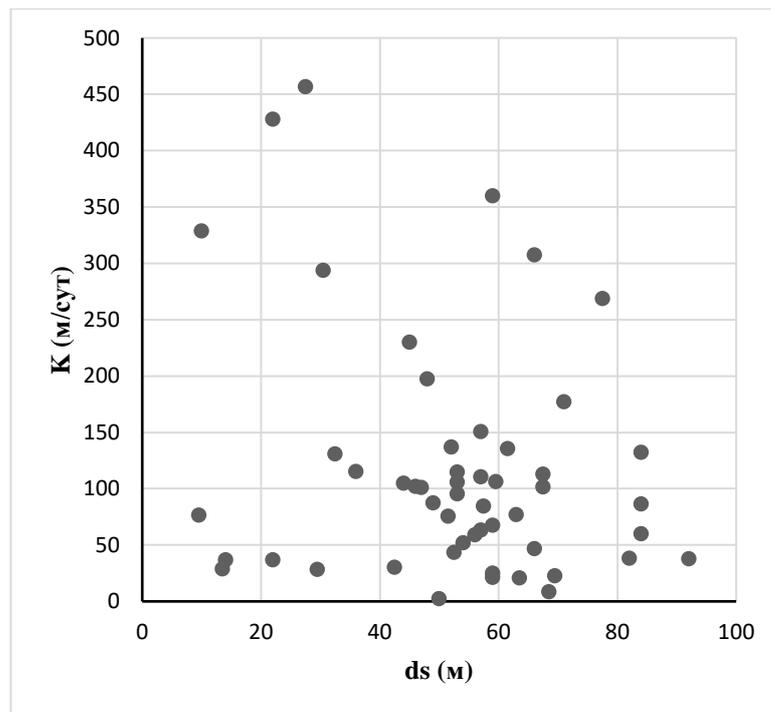


Рис. 3.16. Корреляционная зависимость между коэффициентом фильтрации ( $K$ ) и глубиной скважины ( $ds$ ) для всех скважин, оборудованных на четвертичные отложения

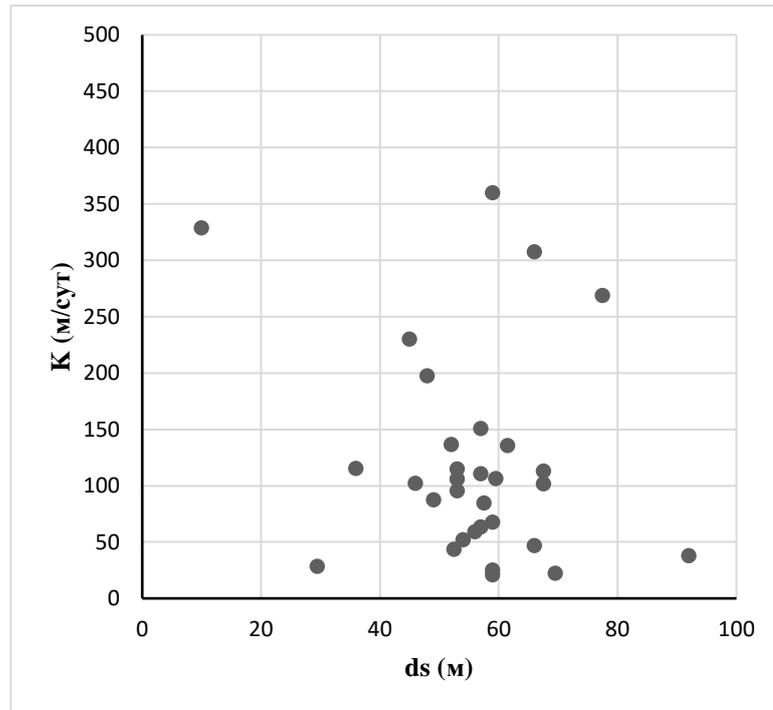


Рис. 3.17. Корреляционная зависимость между коэффициентом фильтрации (K) и глубиной скважины (ds) для скважин, оборудованных единым фильтром на отложения куркара и гравия в долине вади Эль-Ариш

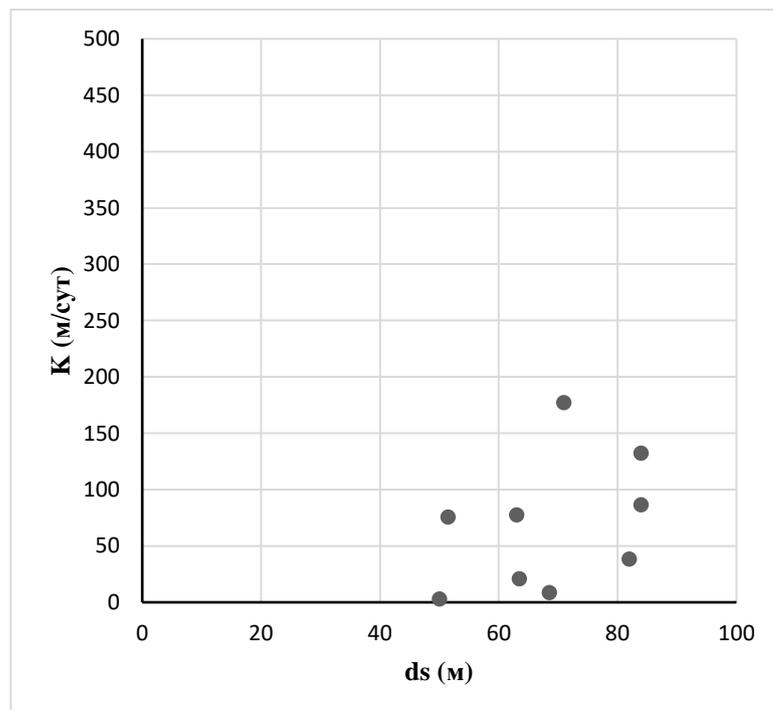


Рис. 3.18. Корреляционная зависимость между коэффициентом фильтрации (K) и глубиной скважины (ds) в отложениях куркара на северо-восточном побережье, в районах Эль-Ариш, Шейх Зувайид и Рафах

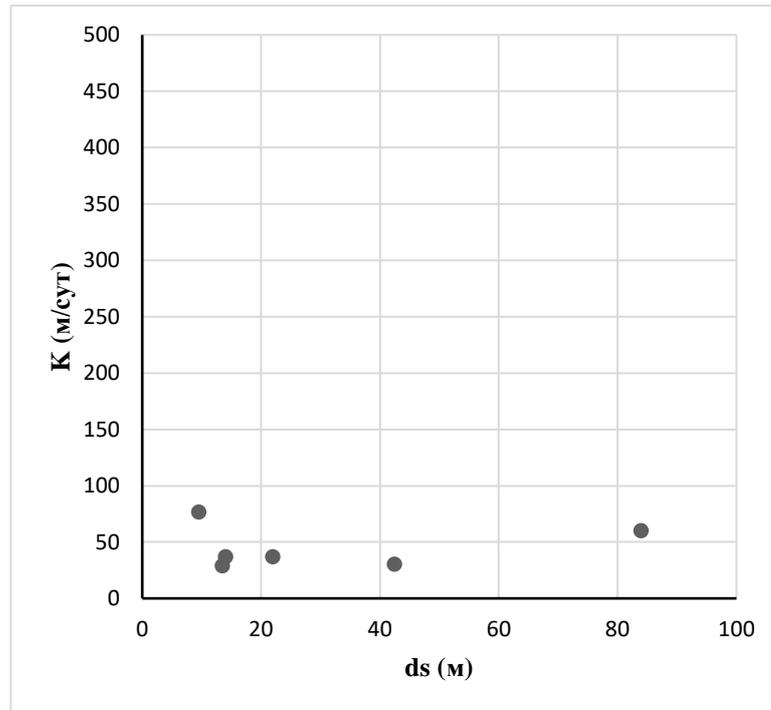


Рис. 3.19. Корреляционная зависимость между коэффициентом фильтрации (K) и глубиной скважины (ds) в отложениях песков на северо-восточном побережье, в районах Эль-Ариш, Шейх Зувайид и Рафах

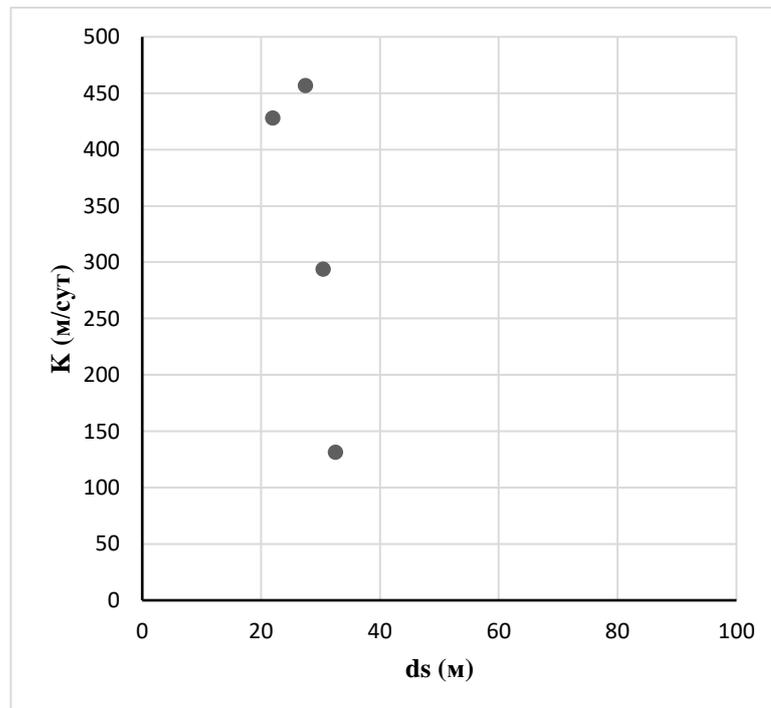


Рис. 3.20. Корреляционная зависимость между коэффициентом фильтрации (K) и глубиной скважины (ds) в песчаных отложениях в северо-западной области Бир-эль-Абд

Как видно на этих рисунках, однозначной зависимости (тренда) ни по всем четвертичным отложениям в целом, ни по каждой из отдельных

выборки не наблюдается. Таким образом, следует принять, что в пределах развития четвертичных пород до реально зафиксированных глубин, не превышающих 100 метров, изменения фильтрационных свойств горных пород с глубиной не происходит. И, следовательно, зафиксированные выше диапазоны изменения значений коэффициентов фильтрации различных четвертичных отложений определяются не геостатическим давлением, а плотностью упаковки рыхлых пород и степенью их вторичной цементации, сформировавшимися как непосредственно в ходе осадконакопления, так и в период протекания последующих вторичных процессов, очевидно, связанных с фильтрацией подземных вод.

В соответствии со сказанным выше было произведено площадное (в плане) районирование территории развития четвертичных отложений по значениям коэффициентов фильтрации горных пород в пределах прибрежной равнины шириной до 15 км, что является чрезвычайно важным с точки зрения оценки перспективности водоснабжения рассматриваемой площади. В таких засушливых регионах, как Северный Синай, подземные воды являются фактически единственным источником воды, используемым местными жителями. Очевидно, что добыча подземных вод из водоносных горизонтов в зонах с более высокими значениями коэффициента фильтрации будет проще и дешевле, и, следовательно, развитие этих областей оказывается более быстрым и всесторонним. Таким образом, проведенное районирование создает базу для более эффективного планирования и управления ресурсами подземных вод, так как фактически является основой для дальнейшего районирования по величине ресурсов подземных вод:

$$\frac{V}{t} = \frac{K \cdot h \cdot A}{l} \quad (1)$$

где  $V$  – объем воды,  $t$  – время ( $V/t$  – дебит естественных ресурсов подземных вод в рассматриваемой точке);  $K$  – коэффициент фильтрации;  $h / l$  –

гидравлический уклон подземных вод,  $A$  – площадь поперечного сечения потока подземных вод.

Указанное районирование прибрежной равнины по проницаемости проводилось, как и статистические оценки, отдельно по площадям развития различных типов пород (рис. 3.21 и 3.22): 1) для объединенной водоносной толщи, представленной отложениями куркара и гравием (единым фильтром) в области Эль-Ариш и водоносного горизонта отложений куркара на северо-восточном побережье исследуемой области (в западной части прибрежной равнины эти отложения не опробовались) и 2) для водоносного горизонта, сложенного песками и развитого как на северо-восточном побережье исследуемой области, в районах Эль-Ариш, Рафах и Шейх Зувайид, так и на северо-западе, в районе Бир-эль-Абд.

Как показано на рисунке 3.21, в самой северо-восточной части рассматриваемой площади, вблизи границы Республики Египет с сектором Газа и Израилем, значения коэффициента фильтрации в водоносном горизонте, представленном отложениями куркара, будут меньше 100 м/сут ( $K < 100$  м/сут), а на остальной территории, в районе вадии Эль-Ариш и во внутренних частях исследуемой области, где дополнительно развит гравийный водоносный горизонт, коэффициенты фильтрации будут в основном больше 100 м/сут ( $K > 100$  м/сут). Таким образом, развитие водоснабжения за счет горизонтов, представленных отложениями куркара и гравием, является наиболее перспективным в районе вадии Эль-Ариш, чем в северо-восточных районах Северного Синая.

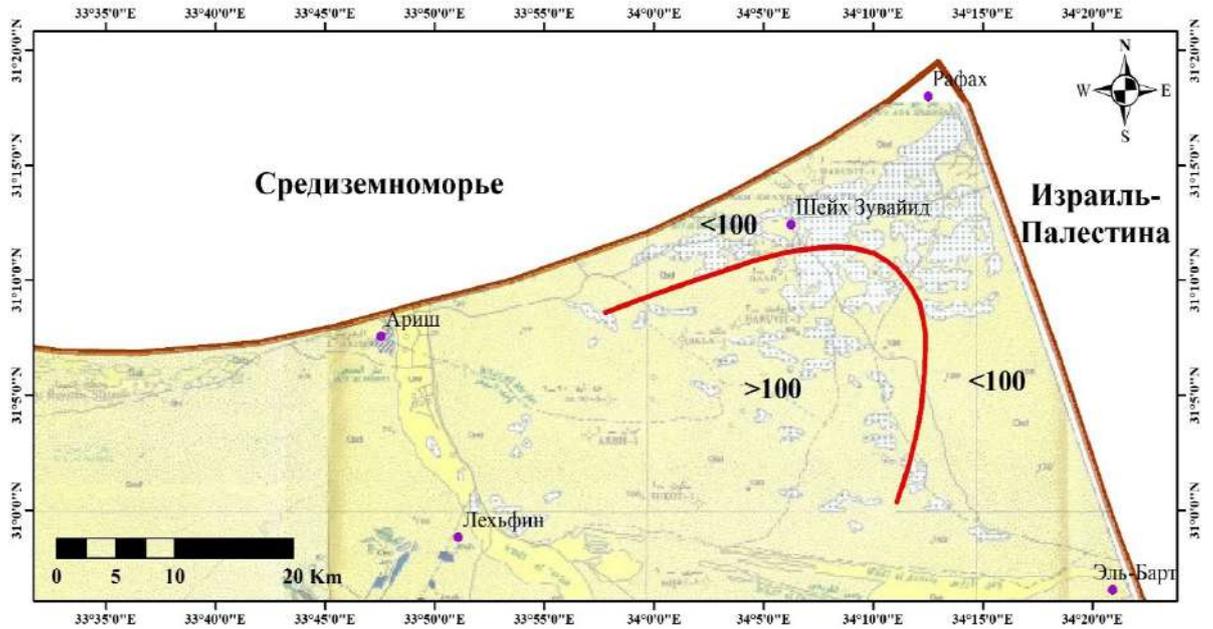


Рис. 3.21. Карта районирования площади развития водоносного горизонта, представленного отложениями куркара и гравием, по значению коэффициента фильтрации  $K$ , м/сут

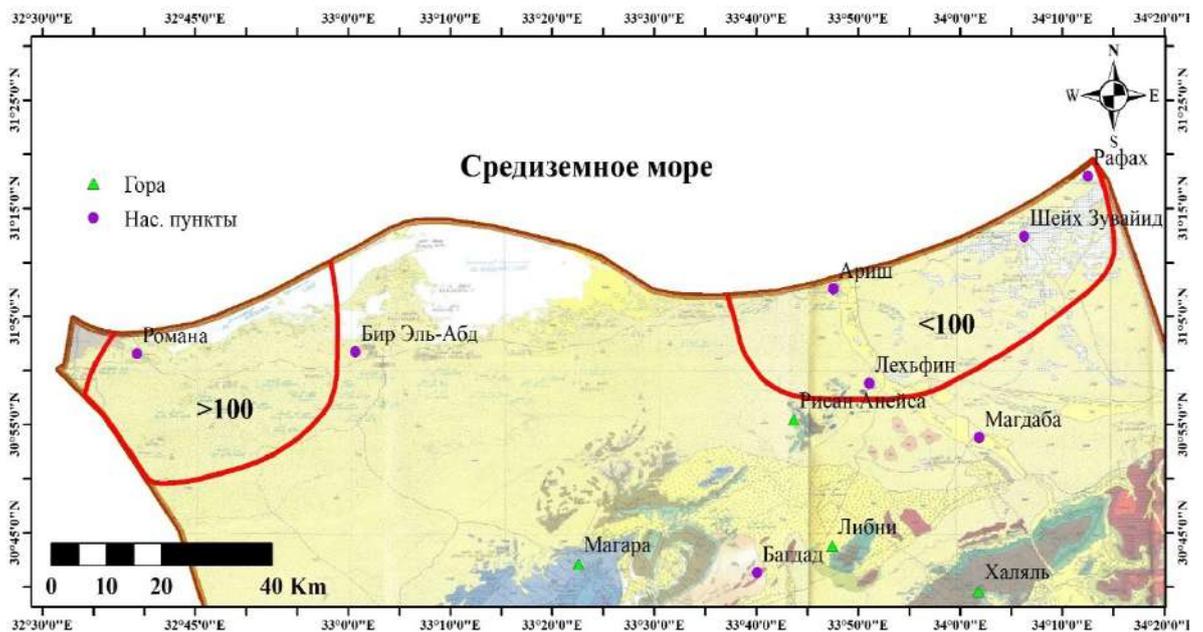


Рис. 3.22. Карта районирования площади развития водоносного горизонта, представленного песками, по значению коэффициента фильтрации  $K$ , м/сут

Как показано на рисунке 3.22, в водоносном горизонте, представленном песками, в целом во всех северо-восточных районах Северного Синая (и Эль-Ариш, и Рафах, и Шейх Зувайид) значения коэффициентов фильтрации составляют меньше 100 м/сут ( $K < 100$  м/сут),

а на северо-западе Северного Синая, в районе Бир-эль-Абд коэффициенты фильтрации больше 100 м/сут ( $K > 100$  м/сут). Таким образом, развитие водоснабжения за счет горизонта, представленного песками в районах северо-западной части Северного Синая, будет более перспективным, чем в его северо-восточной части.

#### Дочетвертичные отложения

Как и для четвертичных водоносных горизонтов, для водоносных горизонтов, развитых в дочетвертичных отложениях, с помощью программы SPSS были выполнены статистические оценки для распределения значений коэффициента фильтрации  $K$  (м/сут), полученного в результате полевых опробований скважин.

В качестве выборок для статистических оценок были определены две разновидности водовмещающих пород, развитые практически на всей территории Северного Синая: 1) верхнемеловые и палеогеновые известняки и 2) нижнемеловые песчаники. Более дробное деление по возрасту водовмещающих пород оказалось невозможным из-за сходства литологических и гидродинамических особенностей верхнемелового и палеогенового водоносных горизонтов. Результаты расчета статистических параметров по этим выборкам в сопоставлении со статистическими характеристиками для генеральной совокупности по всем дочетвертичным водоносным горизонтам приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2- Статистические параметры для распределения значений коэффициента фильтрации (К, м/сут) в различных горных породах дочетвертичных отложений

Параметр	Дочетв. в целом	Известняк К <sub>2</sub>	Песчаник К <sub>1</sub>
N	128	68	60
Среднее	13	19	7
Медиана	4	4	4
Станд. отклонение	24	29	13
Минимум	0,01	0,01	0,13
Максимум	113	113	87

Как видно из таблицы 3.2, средние и медианные значения коэффициентов фильтрации и в известняках, и в песчаниках дочетвертичных отложений являются величинами одного порядка, но в разы и даже в десятки раз меньше, чем в четвертичных водоносных горизонтах (ср. с табл. 3.1.). При этом отмечается весьма большой разброс значений коэффициента фильтрации в пределах каждой из рассматриваемых выборок: в известняках - от 0,10 до 113 м/сут, в песчаниках - от 0,13 до 87 м/сут. Таким образом, очевидно, что проницаемость всех дочетвертичных отложений определяется не фильтрационными свойствами в пористых блоках, а интенсивностью трещиноватости как известняков, так и песчаников. Особенно это заметно в выборке для известняков – медиана составляет всего 4 м/сут при среднем 19 м/сут, что свидетельствует о локальном развитии трещиноватости на отдельных участках, где коэффициент фильтрации оказывается существенно выше среднего.

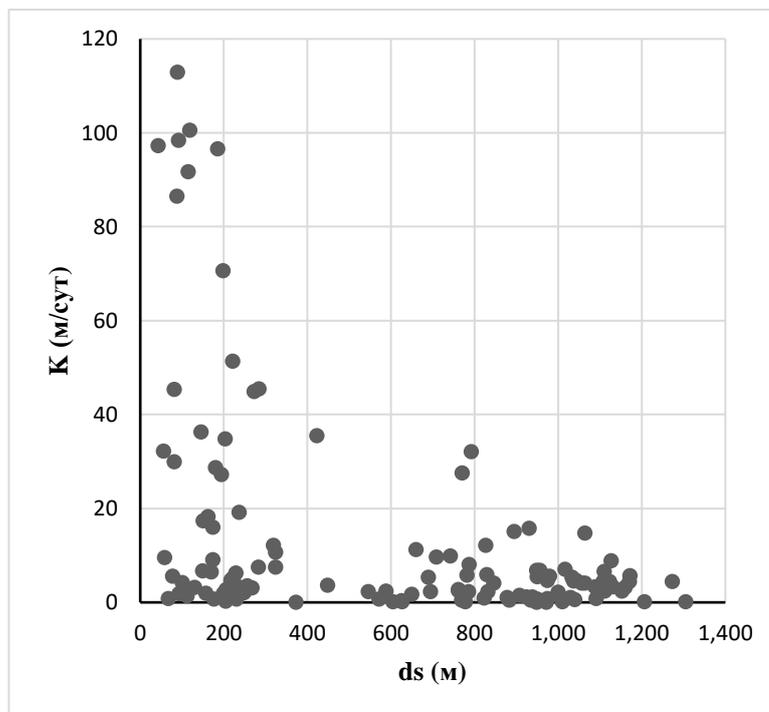


Рис. 3.23. Корреляционная зависимость между коэффициентом фильтрации (K) и глубиной скважины (ds) для всех скважин, оборудованных на дочетвертичные отложения

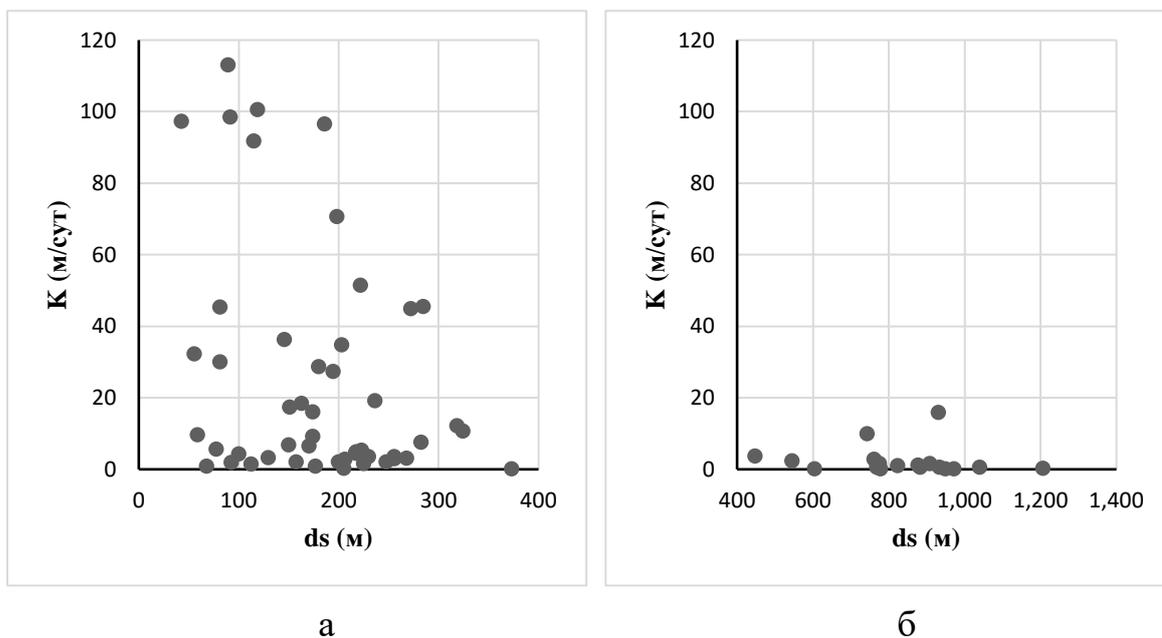


Рис. 3.24 а, б. Корреляционная зависимость между коэффициентом фильтрации (K) и глубиной скважины (ds) для всех скважин, вскрывающих известняки

На рисунках 3.23–3.25 представлены графики корреляционных зависимостей между коэффициентом фильтрации (K) и глубиной

опробованной скважины ( $ds$ ) как для всех скважин, оборудованных на дочетвертичные отложения, так и для указанных выше двух выборок, соответствующих верхнемеловым-палеогеновым известнякам и нижнемеловым песчаникам.

Как видно на этих рисунках, наибольшие значения коэффициентов фильтрации (более 60 м/сут) как в известняках, так и в песчаниках отмечаются только до глубины менее 200 метров. Наиболее показательными в данном отношении являются графики для известняков (рис. 3.24 а, б). До глубины порядка 400 м однозначной зависимости (тренда) в принципе не наблюдается, и значения коэффициентов фильтрации варьируют от сотых долей м/сут до более, чем 100 м/сут. Но на глубинах более 400 метров эти значения вообще не превышают 20 м/сут, составляя в подавляющем большинстве не более 5 м/сут. В песчаниках на глубинах более 400 м коэффициенты фильтрации в подавляющем большинстве случаев также не превышают 20 м/сут, тяготея к значениям менее 10 м/сут (рис. 3.25).

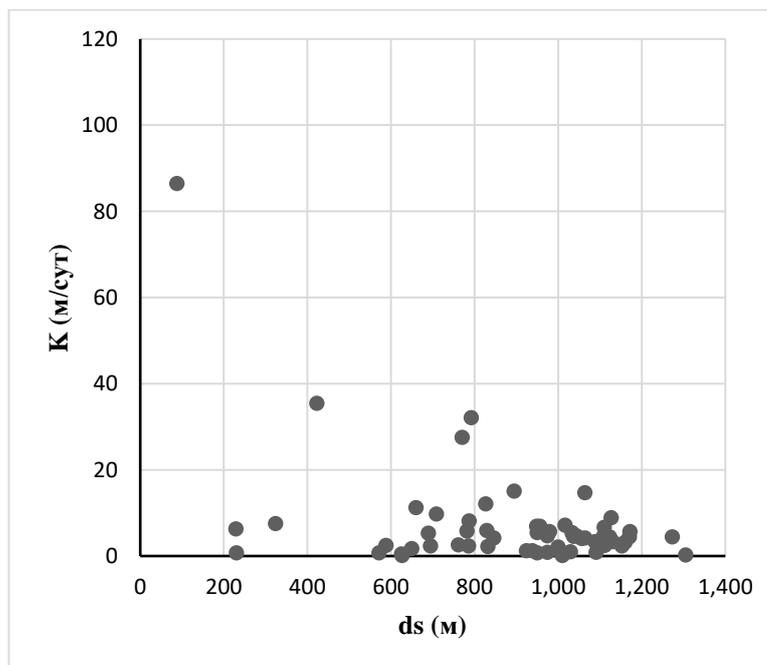


Рис. 3.25. Корреляционная зависимость между коэффициентом фильтрации ( $K$ ) и глубиной скважины ( $ds$ ) для всех скважин, вскрывающих песчаники

Указанные факты, на взгляд автора, подтверждают высказанное выше предположение о том, что фильтрационная проницаемость всех дочетвертичных отложений определяется в первую очередь интенсивностью трещиноватости как известняков, так и песчаников. В данном случае уменьшение значений коэффициента фильтрации с глубиной логично, так как обусловлено геостатическим давлением: масса перекрывающих отложений увеличивается, что ведет к значительному уменьшению именно трещиноватости водовмещающих пород (сжиманию трещин), в то время как пористость в сцементированных отложениях (известняках и песчаниках) меняется мало.

При этом на малых глубинах повышенная проницаемость коренных горных пород, вероятно, определяется приуроченностью опробованной точки к какому-либо разрывному нарушению, в пределах которого естественным образом имеет место повышенная проницаемость. Именно этим можно объяснить большой разброс значений коэффициентов фильтрации на малых глубинах.

В соответствии со сказанным выше было произведено площадное (в плане) районирование территории развития дочетвертичных отложений по значениям коэффициентов фильтрации горных пород в пределах Северного Синая, что является чрезвычайно важным с точки зрения оценки перспективности водоснабжения рассматриваемой площади.

Районирование, как и статистические оценки, проводилось отдельно для водовмещающих пород, представленных известняками, и отложений, представленных песчаниками. В обеих выборках вся совокупность значений коэффициентов фильтрации была разделена на три основных градации (малые, средние и высокие значения), представленные в таблицах 3.3 и 3.4, соответственно.

Таблица 3.3- Градации значений коэффициента фильтрации в известняках ( $K_2+P_g$ ) при районировании

№	Зона	К (м/сут)	Градация
1	А	<10	малые
2	В	10 - 40	средние
3	С	> 40	высокие

Таблица 3.4- Градации значений коэффициента фильтрации в песчаниках ( $K_1$ ) при районировании

№	Зона	К (м/сут)	Градация
1	А	<3	малые
2	В	3 - 10	средние
3	С	> 10	высокие

Карты, составленные по результатам районирования территории Северного Синая по указанным градациям значений коэффициента фильтрации, представлены на рисунках 3.26 (для известняков) и 3.27 (для песчаников).

Как видно на этих рисунках, на подавляющей части территории Северного Синая развиты водовмещающие дочетвертичные породы (и известняки, и песчаники) со средними и малыми значениями коэффициентов фильтрации. Области с высокими значениями коэффициентов фильтрации отмечаются только в отдельных локальных зонах.

С практической точки зрения можно констатировать, что наиболее перспективными для добычи подземных вод из водоносных горизонтов (без учета их химического состава) являются следующие районы: в окрестностях Эль-Кусаима, Гебель Эль-Магара, Багдад, Гебель Либни для горизонтов, представленных известняками, и вокруг Эль-Кусаима, Гебель Ариф Эль-Нага, а также в Рафахе и Шейх Зувайиде для горизонтов, представленных песчаниками.

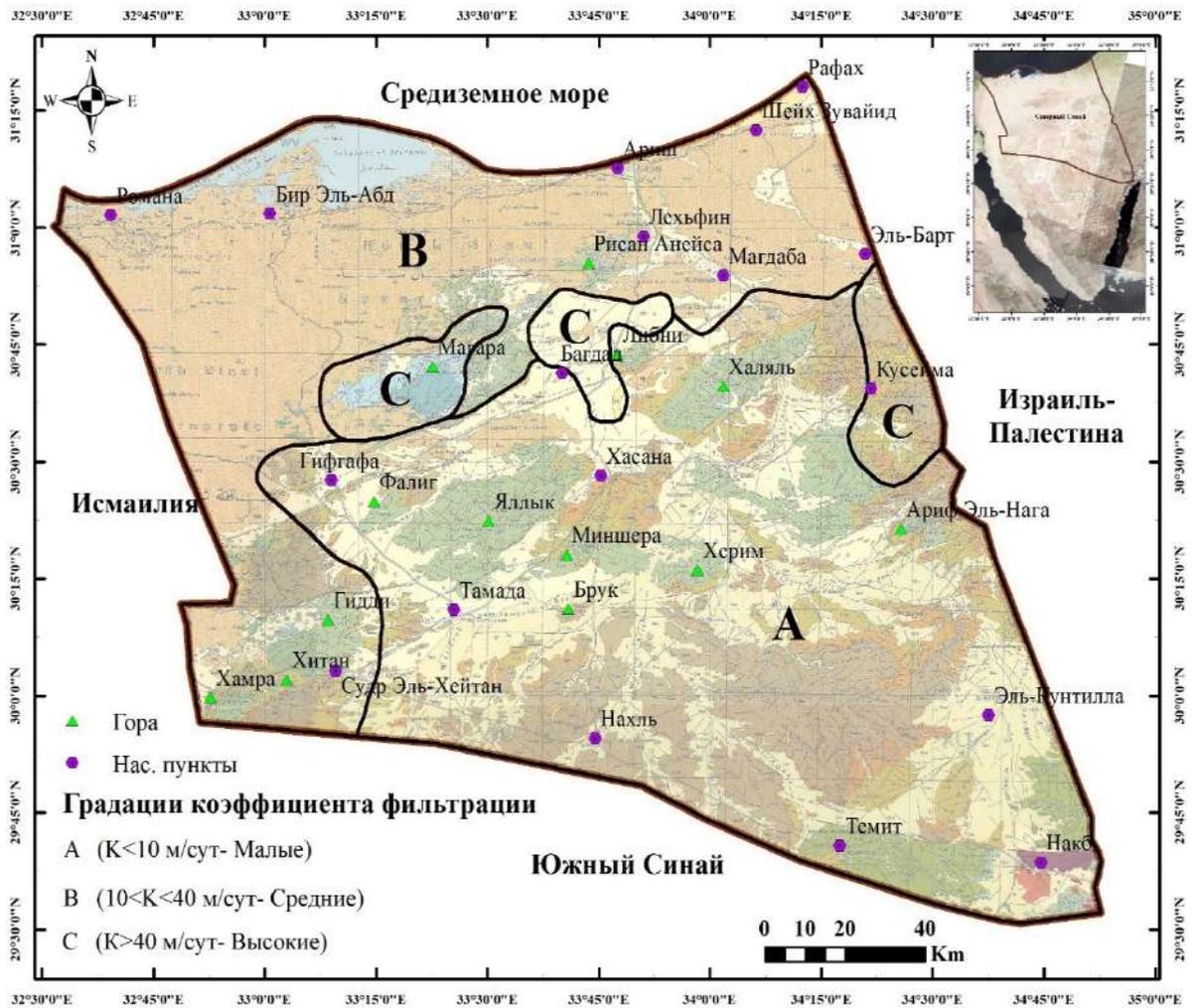


Рис. 3.26. Карта районирования площади развития водонасыщенных известняков по значению коэффициента фильтрации  $K$ , м/сут (градации А, В и С см. в таблице 3.3)

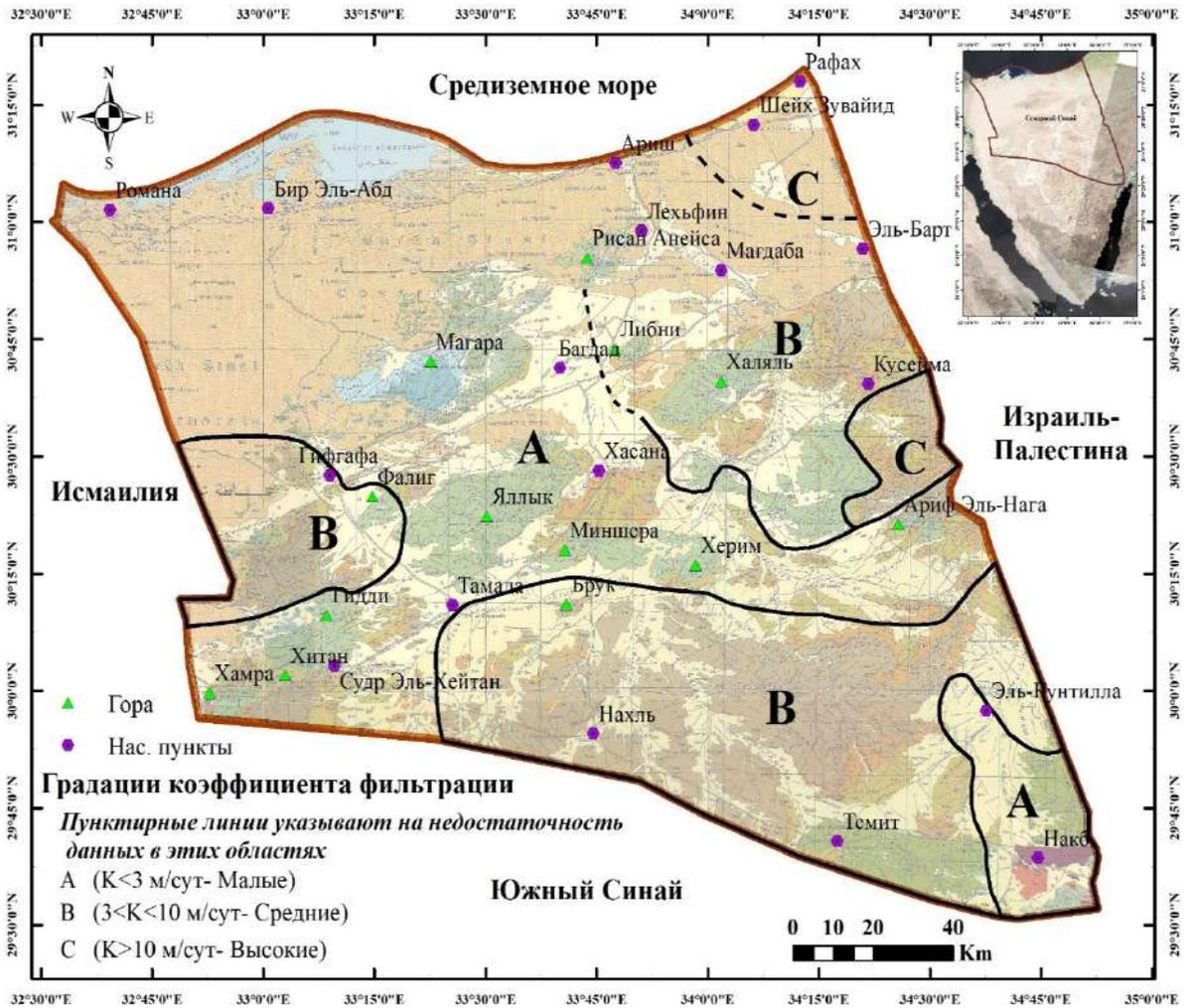


Рис. 3.27. Карта районирования площади развития водонасыщенных песчаников по значению коэффициента фильтрации  $K$ , м/сут (градации А, В и С см. в таблице 3.4)

## ГЛАВА 4. ХАРАКТЕРИСТИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД СЕВЕРНОГО СИНАЯ

Химический состав подземных вод северного Синая является основным фактором оценки возможности их использования для питьевого водоснабжения и орошения сельскохозяйственных угодий. Представленная ниже характеристика химического состава подземных вод Северного Синая составлена по совокупности результатов проведенных ранее на данной территории гидрогеологических исследований, в том числе и выполненных в последние годы [16; 17; 26; 27; 33; 37; 39; 40; 43; 46; 50; 63; 66; 70; 74; 83; 88; 90; 98; 104; 105; и др.]. Как и в случае с оценкой фильтрационных свойств горных пород, рассмотренных в главе 3, основой фактологической базой по химическому составу подземных вод также являлась информация по гидрогеологическим скважинам, содержащаяся в обобщающем отчете “North Sinai Groundwater Resources Study in the Arab Republic of Egypt” [60], а также дополнительно предоставленная Институтом водных исследований (WRRRI) при Министерстве ирригации и водных ресурсов Арабской Республики Египет [7]. Результатом выполненной систематизации стала база данных по химическому составу подземных вод, в которую в совокупности включены материалы по 200 скважинам [31; 34; 71; 72; 73; 101; и др.].

В этой главе дается обзор различных гидрохимических характеристик подземных вод на Северном Синае: общей минерализации (TDS); концентраций макрокомпонентов – главных анионов ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ ) и катионов ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{K}^+$ ) и величины pH. Автором был проведен статистический анализ существующих гидрохимических данных, рассчитаны некоторые генетические коэффициенты, а также выполнена оценка индексов насыщения (SI) подземных вод по отношению к основным породообразующим минералам с использованием программы PHREEQC.

Все эти оценки сделаны в соответствии с возрастом водовмещающих пород (отдельно для четвертичных и дочетвертичных отложений), а также в соответствии с типом водовмещающих пород. В заключение было проведено районирование территории Северного Синая по значениям общей минерализации (TDS).

#### **4.1. Водоносные горизонты четвертичных отложений**

Условия развития водоносных горизонтов в четвертичных отложениях подробно описаны в главе 3. Отметим здесь главное: распространение четвертичных водоносных горизонтов значимой мощности ограничено прибрежной равниной шириной 10 до 15 км в самой северной части Северного Синая, вдоль Средиземного моря; основными водовмещающими породами четвертичных отложений являются песок, гравий и отложения куркара.

Главной проблемой использования подземных вод четвертичных водоносных горизонтов в рассматриваемом районе является их высокая соленость. При этом существуют три основных фактора, которые могут определять эту повышенную соленость: засоление подземными водами из нижележащих дочетвертичных водоносных горизонтов, испарительное концентрирование или интрузия современных морских вод из Средиземного моря.

Анализируя гидрогеохимическую обстановку в четвертичных отложениях по типам пород в целом, можно констатировать следующее.

Минерализация подземных вод в песчаных водоносных горизонтах или прибрежных песчаных дюнах, развитых в верхней части разреза, низка и колеблется от 300 до 800 мг/дм<sup>3</sup>, особенно в песчаных дюнах в районах Шейх-Зувайид и Рафах – там она наименьшая. Скважины в отложениях прибрежных песчаных дюн обычно неглубокие: от 20 до 40 метров, и пески

там часто залегают на глинистом водоупоре. То есть этот горизонт локально изолирован от нижележащих и питается в соответствии с текущим гидрометеорологическим циклом атмосферных осадков.

Водоносные горизонты, представленные гравием, эксплуатируются только в пределах аллювиальной долины вади Эль-Ариш. В скважинах, расположенных в нижнем течении вади, на северной оконечности аллювиальной долины, минерализация составляет менее 2000 мг/дм<sup>3</sup>; а в остальной части долины колеблется в диапазоне от 3000 до 5100 мг/дм<sup>3</sup>. Пресные воды с минерализацией менее 1000 мг/дм<sup>3</sup> в отдельных скважинах, оборудованных на гравийные отложения, очевидным образом указывают на пополнение запасов пресной воды в этих слоях за счет современного инфильтрационного питания атмосферными осадками, так же, как и в прибрежных песчаных дюнах.

Минерализация подземных вод в водоносном горизонте в отложениях куркара колеблется от 2500 до 3800 мг/дм<sup>3</sup> в аллювиальной долине вади Эль-Ариш и от 2200 до 5600 мг/дм<sup>3</sup> в районах Шейх-Зувайд и Рафах. При совместном опробовании скважинами горизонтов, сложенных гравием и куркаром, между которыми и в естественных условиях имеется гидравлическая связь, минерализация изменяется в диапазоне от 2200 до 3700 мг/дм<sup>3</sup>. Возможно, высокая соленость подземных вод в отложениях куркара является изначальной – сингенетичной. Однако существует также вероятность их засоления солеными подземными водами из нижележащих водоносных горизонтов дочетвертичного возраста, представленных известняками или песчаниками. Кроме того, следует учитывать, что водоносный горизонт в отложениях куркара в районе Эль-Ариш неминуемо питается за счет периодических крупных наводнений, происходящих в паводковый период с интенсивностью раз в десять-пятнадцать лет.

В настоящем исследовании с помощью программы SPSS выполнены статистические оценки для распределения значений указанных выше гидрохимических показателей подземных вод, полученных в результате полевых опробований скважин, и построены различные корреляционные зависимости. Были рассмотрены различные выборки данных в зависимости от районов опробования (см. главу 3): 1) генеральная совокупность для всех четвертичных отложений («четв. в целом»); 2) «зона\_А» – район Эль-Ариш, где водоносные горизонты представлены песками, гравием и отложениями куркара (по 74 скважинам); 3) «зона\_ШР» – районы Рафах и Шейх Зувайид, где развиты водоносные горизонты, сложенные песками и отложениями куркара (по 25 скважинам); 4) «зона\_БРЭА» – район Бир-эль-Абд, где залегает только песчаный водоносный горизонт (по 65 скважинам).

В качестве переменных («выборочных» значений) рассматривались: минерализация (TDS) в размерности мг/дм<sup>3</sup> (ppm), концентрации всех указанных выше растворенных макрокомпонентов в %-экв (% eqm), величина рН в ед. рН, а также глубиной опробованной скважины (ds) в метрах. В таблице 4.1 представлены результаты статистической обработки различных, указанных выше, выборок по величине минерализации подземных вод в размерности мг/дм<sup>3</sup>; в таблице 4.2 - результаты статистической обработки для величины рН в ед. рН; а в таблицах 4.3-4.8 - результаты статистической обработки тех же выборок для концентраций макрокомпонентов  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$  в %-экв, соответственно.

Принципиальных различий в статистических параметрах распределения различных показателей химического состава подземных вод для указанных трёх территориальных выборок: зона\_А, зона\_ШР и зона\_БРЭА - не наблюдается. Во всех трёх зонах развиты как пресные, так и солоноватые, околонеутральные или слабощелочные подземные воды в

среднем сульфатно-хлоридные кальциево-магниевые-натриевые (или магниевые-натриевые). Некоторое отклонение отмечается для вод восточной зоны BR, где при относительно повышенной минерализации зафиксированы и минимальные значения концентрации  $\text{HCO}_3^-$ : 0,1-2,5 %-экв.

Таблица 4.1- Статистические параметры для распределения значений минерализации (TDS, мг/л) в различных зонах развития водоносных горизонтов в четвертичных отложениях

Статистика	Четв. в целом	Зона_А	Зона_ШР	Зона_БРЭА
N	164	74	25	65
Среднее	3304	2868	1668	4431
Медиана	3174	2800	1339	4100
станд. откл.	1909	1118	1519	2105
Минимум	248	526	248	329
Максимум	13400	6500	5600	13400

Таблица 4.2- Статистические параметры для распределения величины рН (ед. рН) в различных зонах развития водоносных горизонтов в четвертичных отложениях

Статистика	Четв. в целом	Зона_А	Зона_ШР	Зона_БРЭА
N	101	41	19	41
Среднее	7,5	7,9	7,5	7,3
Медиана	7,4	7,9	7,4	7,3
станд. откл.	0,4	0,3	0,35	0,25
Минимум	7,1	7,1	7,1	7,1
Максимум	8,7	8,3	8,3	8,7

Таблица 4.3- Статистические параметры для распределения **концентрации** **НСО<sub>3</sub>** (%-экв) в различных зонах развития водоносных горизонтов в четвертичных отложениях

Статистика	Четв. в целом	Зона_А	Зона_ШР	Зона_БРЭА
N	101	41	19	41
Среднее	6,5	8	15,5	1
Медиана	3,5	7,5	6	1
станд. откл.	10	4	18	0,5
Минимум	0,11	1,8	1,8	0,11
Максимум	54,0	20,5	54,0	2,5

Таблица 4.4- Статистические параметры для распределения **концентрации** **SO<sub>4</sub>** (%-экв) в различных зонах развития водоносных горизонтов в четвертичных отложениях

Статистика	Четв. в целом	Зона_А	Зона_ШР	Зона_БРЭА
N	101	41	19	41
Среднее	31	28,5	33	32,5
Медиана	31,5	28	33,5	35,5
станд. откл.	11,5	9	16,5	10,5
Минимум	6,8	9,1	6,8	7,7
Максимум	66,0	45,9	66,0	51,2

Таблица 4.5- Статистические параметры для распределения **концентрации** **Сl** (%-экв) в различных зонах развития водоносных горизонтов в четвертичных отложениях

Статистика	Четв. в целом	Зона_А	Зона_ШР	Зона_БРЭА
N	101	41	19	41
Среднее	62	63	50,5	66,5
Медиана	63	64,5	50,5	64
станд. откл.	12,5	9,5	15,5	10,5
Минимум	22,5	45,3	22,5	47,9
Максимум	92,2	87,9	75,2	92,2

Таблица 4.6- Статистические параметры для распределения **концентрации Mg (%-экв)** в различных зонах развития водоносных горизонтов в четвертичных отложениях

Статистика	Четв. в целом	Зона_А	Зона_ШР	Зона_БРЭА
N	101	41	19	41
Среднее	26,5	27,5	23	26,5
Медиана	27	27,5	17,5	27
станд. откл.	7	6	12	5
Минимум	6,5	14,0	6,5	15,6
Максимум	56,3	39,8	56,3	37,6

Таблица 4.7- Статистические параметры для распределения **концентрации Са (%-экв)** в различных зонах развития водоносных горизонтов в четвертичных отложениях

Статистика	Четв. в целом	Зона_А	Зона_ШР	Зона_БРЭА
N	101	41	19	41
Среднее	14	24,5	7,5	6
Медиана	9,5	25	5	6,5
станд. откл.	10	5	8	3
Минимум	0,63	14,2	1,8	0,63
Максимум	37,9	37,9	32,2	12,9

Таблица 4.8- Статистические параметры для распределения **концентрации Na (%-экв)** в различных зонах развития водоносных горизонтов в четвертичных отложениях

Статистика	Четв. в целом	Зона_А	Зона_ШР	Зона_БРЭА
N	101	41	19	41
Среднее	59	47	68,5	66,5
Медиана	61	45,5	75,5	64,5
станд. откл.	13	7	16	5,5
Минимум	32,2	35,3	32,2	60,0
Максимум	90,	61,8	90,4	79,2

На рисунках 4.1– 4.2 представлены графики корреляционных зависимостей между минерализацией подземных вод (TDS) и глубиной

опробованной скважины (ds) для двух выборок в зависимости от районов опробования: зона\_А и зона\_ШР, соответственно. Как видно на этих рисунках, однозначной зависимости в данных координатах ни по одной из этих зон не наблюдается.

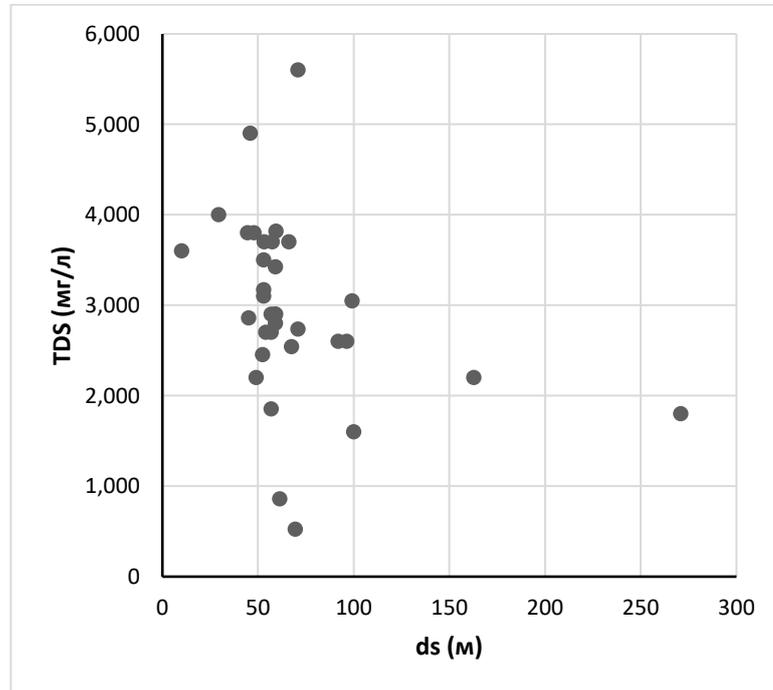


Рис. 4.1. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/л) и глубиной скважины (ds, м) для скважин в зоне\_А

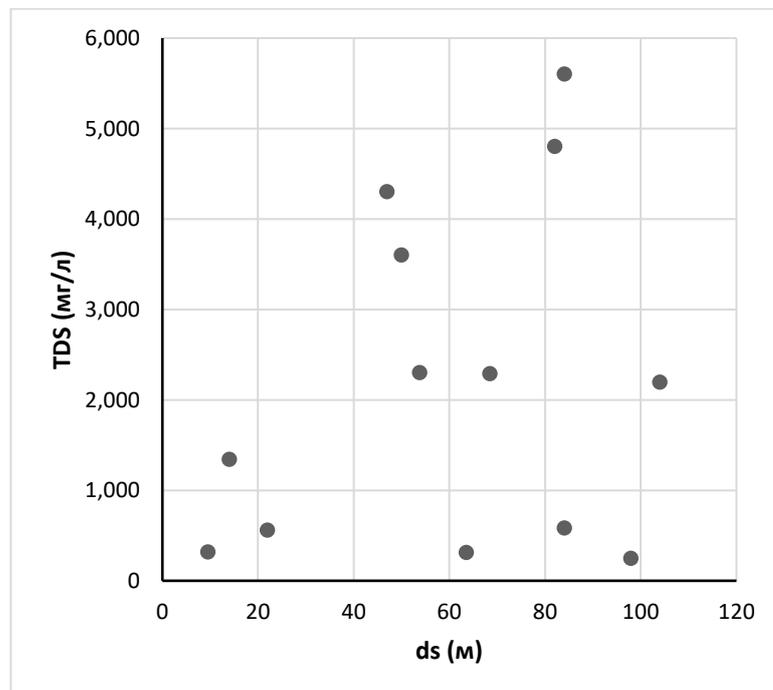


Рис. 4.2. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/л) и глубиной скважины (ds, м) для скважин в зоне\_ШР

Для всех трёх зон опробования А, ШР и БРЭА также были построены корреляционные зависимости между минерализацией (TDS) и концентрациями всех макрокомпонентов в мг-экв/л. На рисунках 4.3 *а,б,в* для зоны\_А, 4.4 *а,б,в* для зоны\_ШР и 4.5 *а,б,в* для зоны\_БРЭА представлены соответствующие графики для Cl, SO<sub>4</sub> и Na, где однозначно проявляется прямая линейная зависимость минерализации от концентраций Cl и Na и менее однозначно - от содержания SO<sub>4</sub>. Для остальных макрокомпонентов: HCO<sub>3</sub>, Mg и Ca существенной зависимости ни по одной из трёх зон не наблюдается.

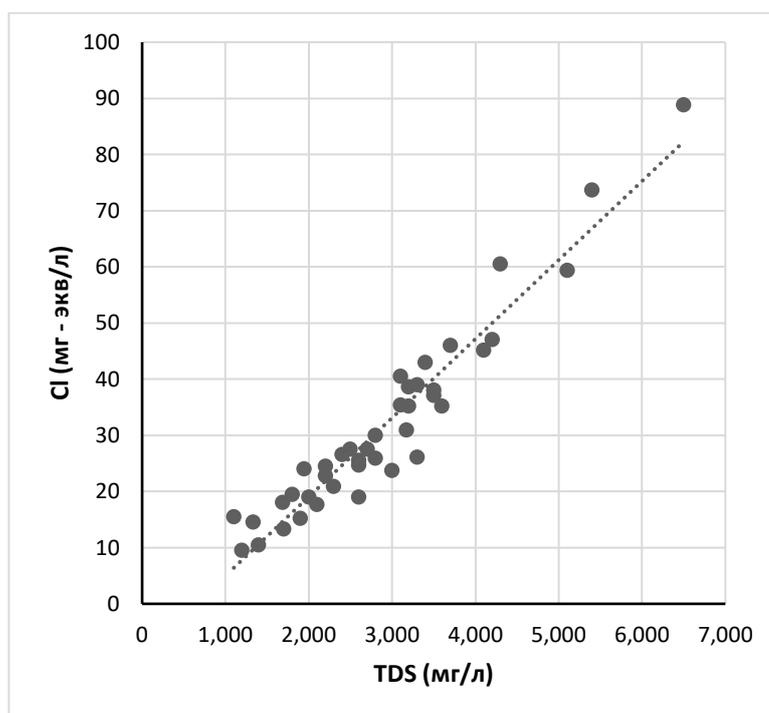


Рис.4.3,*а*. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией Cl (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин в зоне\_А

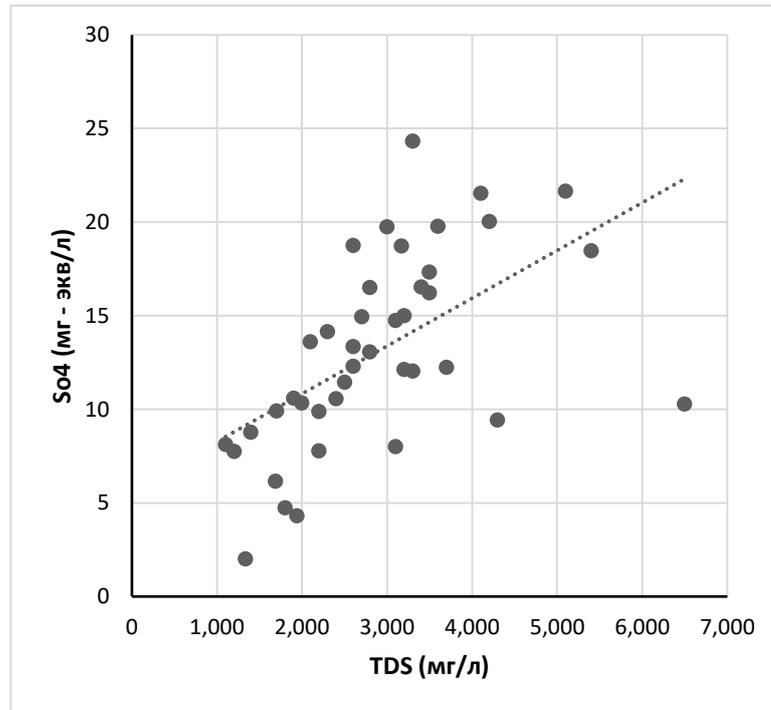


Рис. 4.3,б. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией SO<sub>4</sub> (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин в зоне\_А

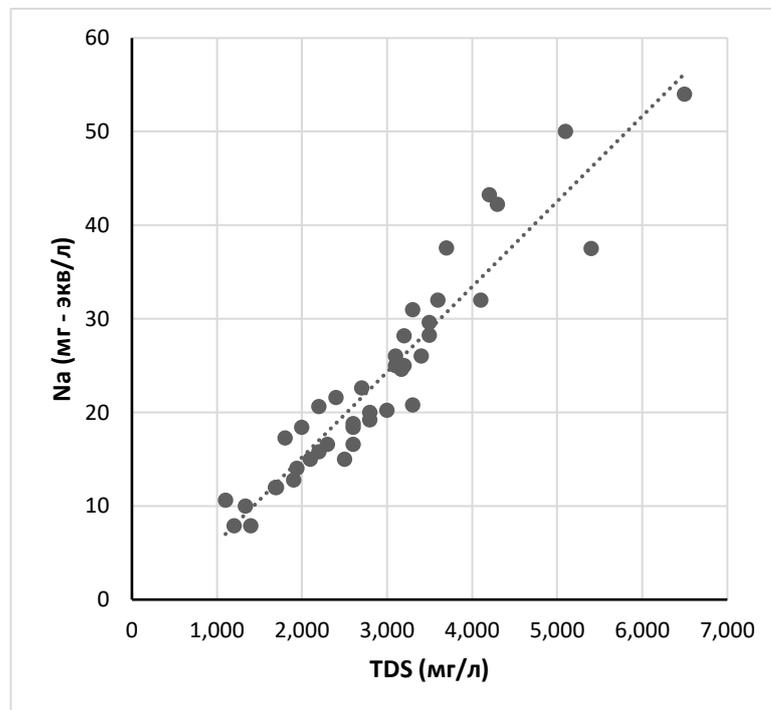


Рис.4.3,в. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией Na (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин в зоне\_А

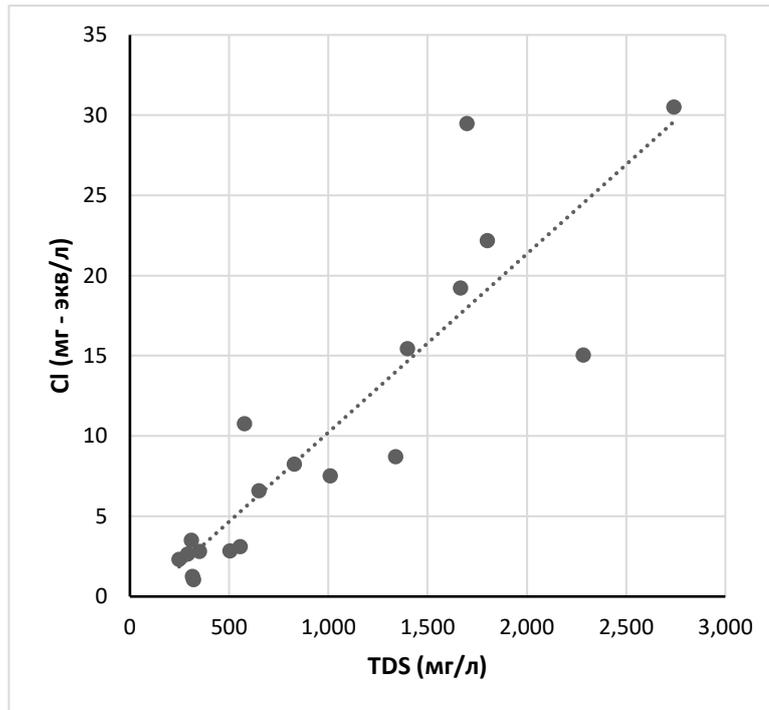


Рис. 4.4,а. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией Cl (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин в зоне ШР

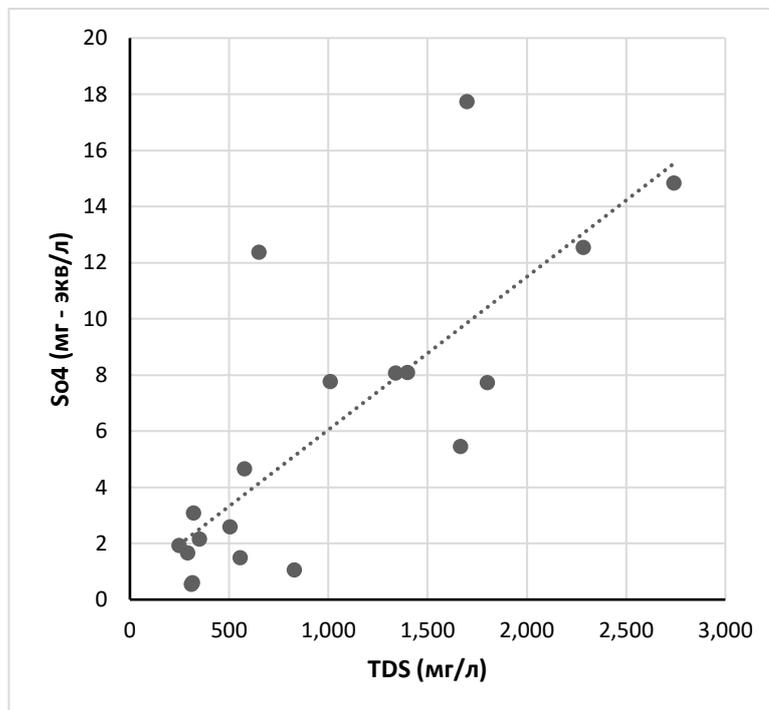


Рис. 4.4,б. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией SO<sub>4</sub> (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин в зоне ШР

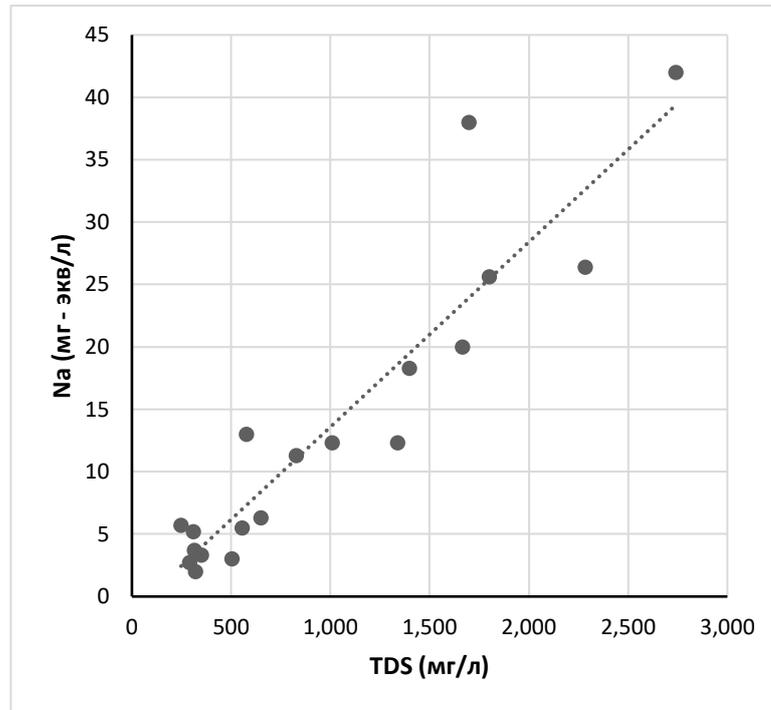


Рис. 4.4,в. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией Na (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин в зоне\_ШР

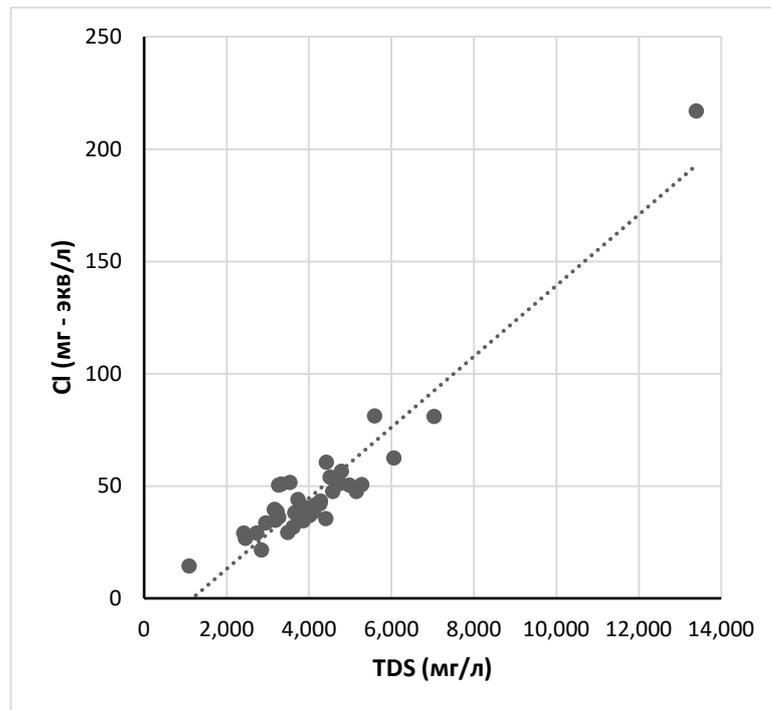


Рис. 4.5,а. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией Cl (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин в зоне\_БРЭА

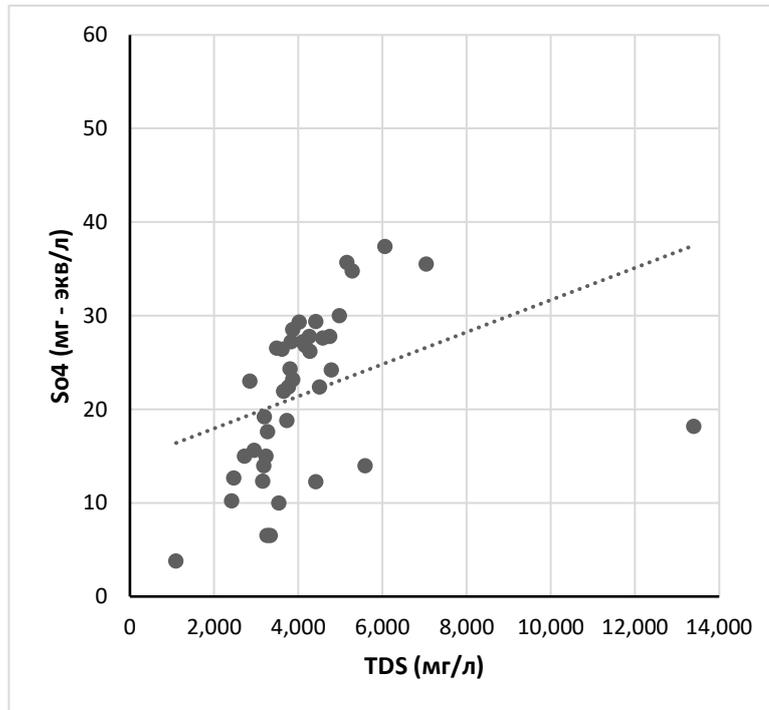


Рис. 4.5,б. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией SO<sub>4</sub> (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин в зоне БРЭА

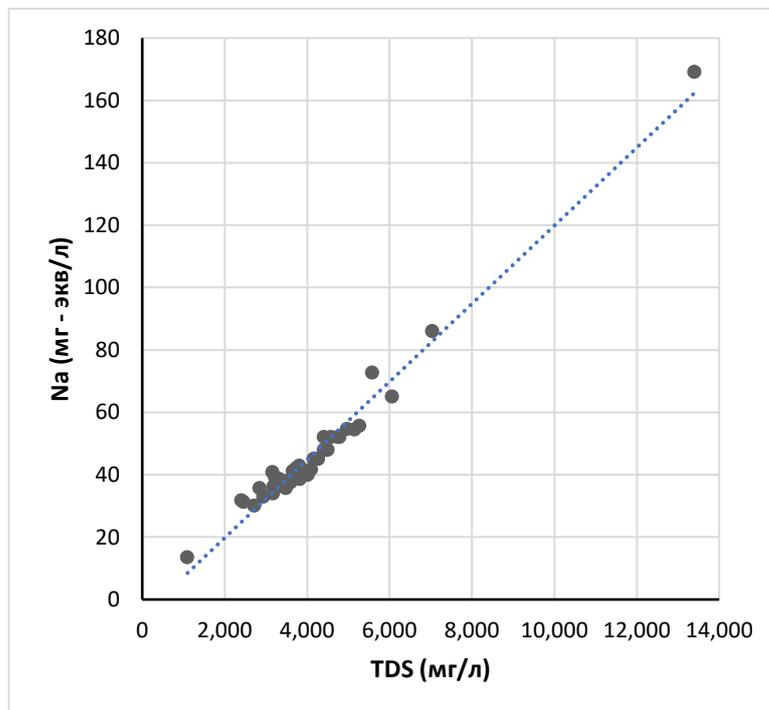


Рис. 4.5,в. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией Na (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин в зоне БРЭА

Таким образом, в согласованности с приведенными выше средними соотношениями %-эквивалентных концентраций макрокомпонентов (табл. 4.3-4.8), основным анионом, определяющим минерализацию подземных вод

в водоносных горизонтах в четвертичных отложениях для всех трёх рассматриваемых зон (по крайней мере в солоноватых водах с минерализацией выше  $1 \text{ г/дм}^3$ ) является  $\text{Cl}^-$  (при дополнительном влиянии  $\text{SO}_4^{2-}$ ), а основным катионом –  $\text{Na}^+$ .

На рисунках 4.6, 4.7 и 4.8 представлены корреляционные зависимости между минерализацией (TDS) и концентрациями всех макрокомпонентов в %-экв. для каждой из трёх зон опробования А, ШР и БРЭА, соответственно. На этих рисунках отчетливо видно, что по мере увеличения минерализации подземных вод в каждой из трёх зон отмечается рост %-ых содержаний в них  $\text{Cl}$  и  $\text{Na}$  и, наоборот, снижение %-ых содержаний  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{SO}_4$  и  $\text{HCO}_3$ . И это также указывает на то, что основными ионами-макрокомпонентами, определяющими минерализацию солоноватых подземных вод в водоносных горизонтах в четвертичных отложениях являются  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ .

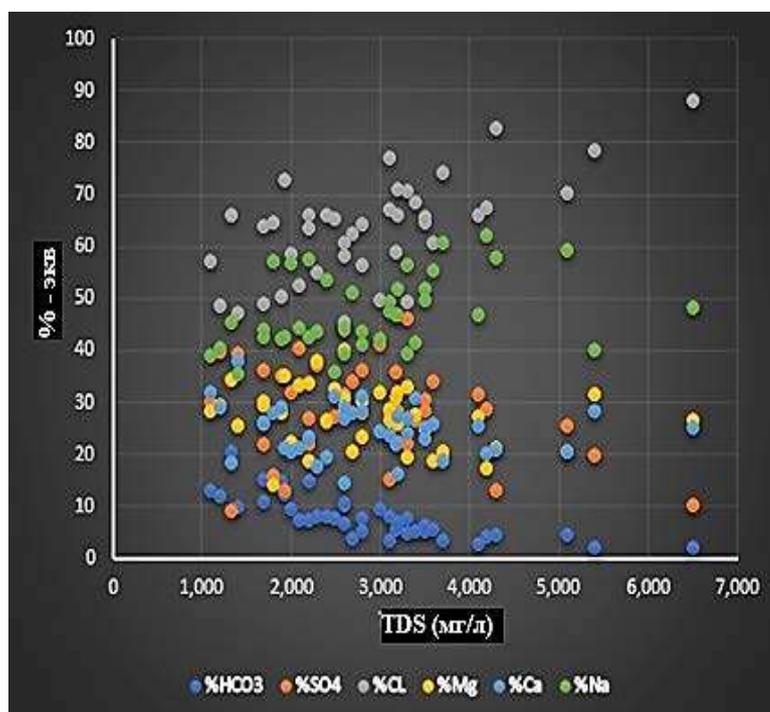


Рис. 4.6. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS,  $\text{мг/дм}^3$ ) и концентрациями макрокомпонентов (%-экв) для скважин в зоне\_А

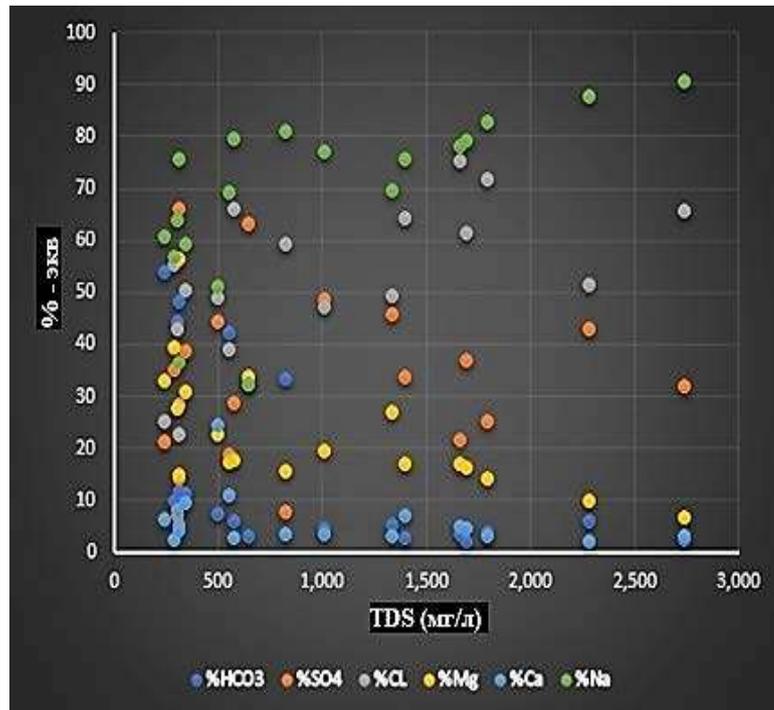


Рис. 4.7. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрациями **макрокомпонентов** (%-экв) для скважин в зоне ШР

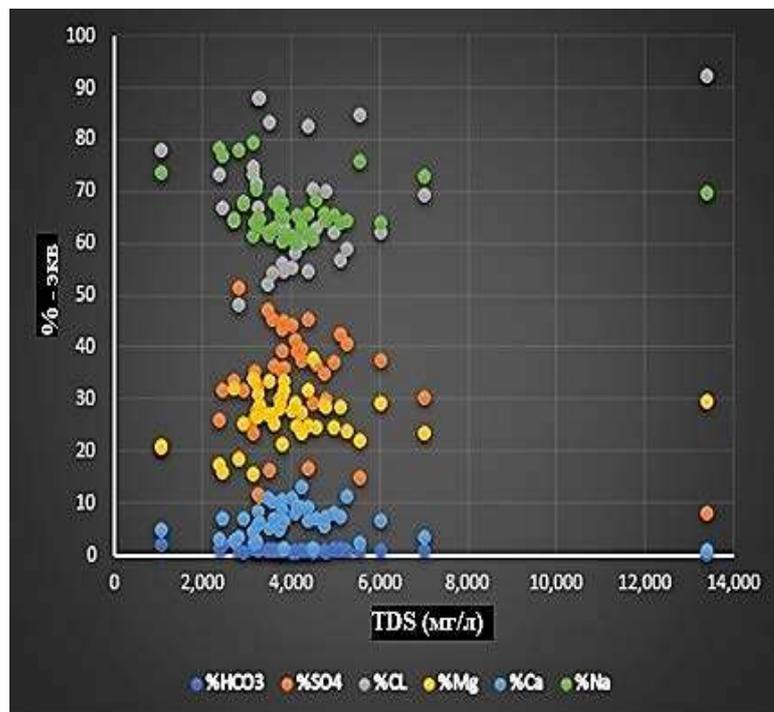


Рис. 4.8. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрациями **макрокомпонентов** (%-экв) для скважин в зоне БРЭА

Корреляционные зависимости между значениями минерализации (TDS) и величиной pH для указанных зон А, ШР и БРЭА представлены на

рисунках 4.9, 4.10 и 4.11. Как видно на этих рисунках, однозначной корреляционной зависимости в данных координатах не наблюдается. И, следовательно, формирование кислотности среды подземных вод в четвертичных отложениях является многофакторным процессом и, очевидно, зависит как от величины инфильтрационного или иного питания горизонтов, так и от интенсивности взаимодействий в системе вода-порода на каждом из отдельных участков.

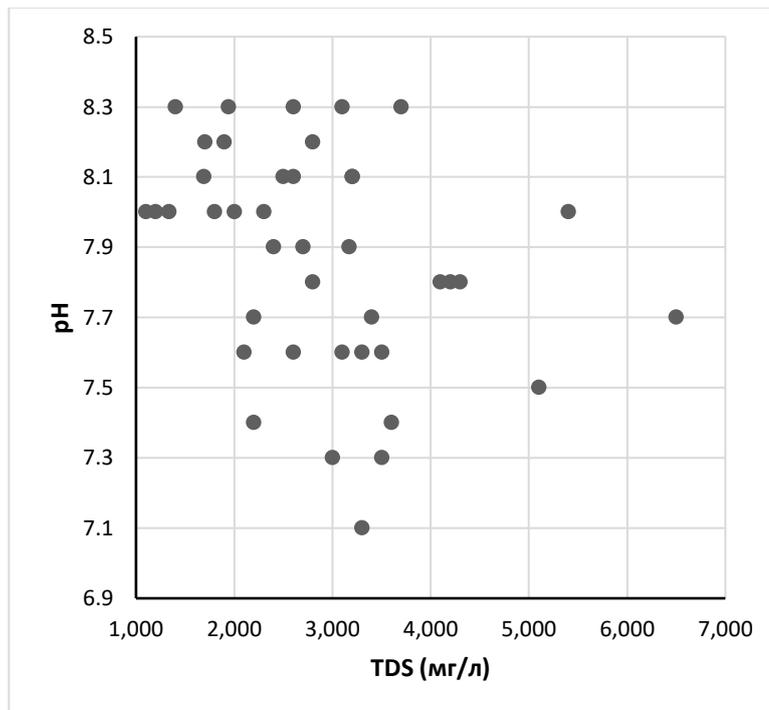


Рис. 4.9. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и величиной pH для скважин в зоне\_А

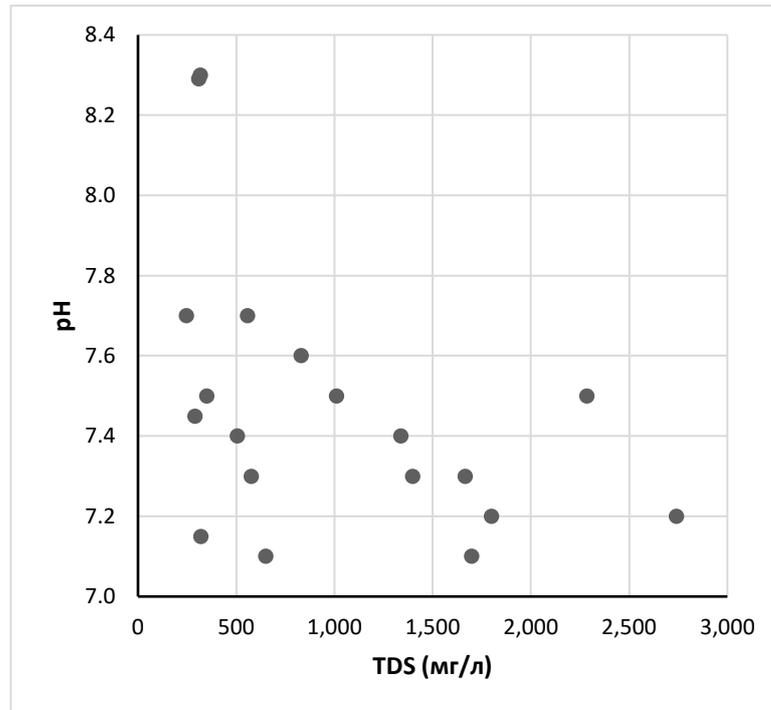


Рис. 4.10. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и величиной **pH** для скважин в зоне\_ШР

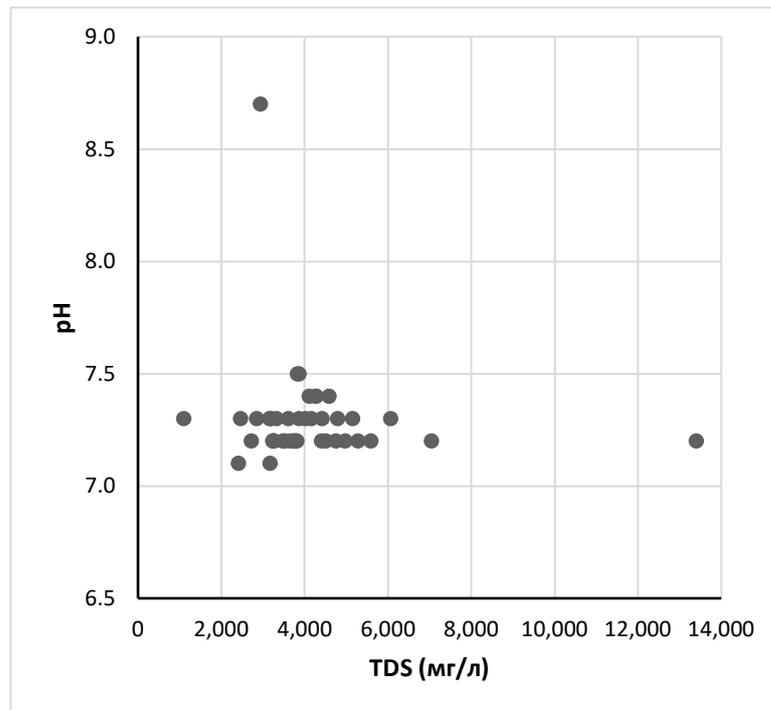


Рис. 4.11. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и величиной **pH** для скважин в зоне\_БРЭА

Дополнительно также для всех трёх зон опробования А, ШР и БРЭА были построены корреляционные зависимости между значениями

минерализации (TDS) и различными генетическими гидрогеохимическими коэффициентами, определяющимися соотношениями концентраций разных макрокомпонентов:  $R_{\text{equ}}=(\text{Na}^++\text{K}^+)/(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ ;  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ;  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ ;  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ . Практически по всем этим коэффициентам для всех трёх зон опробования какой-либо однозначной корреляционной зависимости не наблюдается. Для наиболее характерных точек опробования в пределах каждой зоны были рассчитаны абсолютные значения коэффициентов метаморфизации ( $r\text{Na}/r\text{Cl}$ ) [6] и генетические типы по В.А. Сулину [6] (табл. 4.9).

Таблица 4.9- Значения генетических коэффициентов для некоторых скважин, вскрывших четвертичные отложения

№ пп	Зона	Номер скважины	Глубина скважины, м	pH	$r\text{Na}/r\text{Cl}$	Тип по Сулину	М общ, г/дм <sup>3</sup>
1	А	5-5	300	8,00	0.88	Cl-Mg	1,800
2	А	1-64	101	7,6	0.65	Cl-Mg	2,600
3	А	1-136	60	7,5	0.84	Cl-Mg	5,100
4	ШР	SR T10	103	7,7	1.50	HCO <sub>3</sub> -Na	0,248
5	ШР	SR T1	24	7,7	1.77	HCO <sub>3</sub> -Na	0,557
6	ШР	SR T8	64	7,2	1.15	SO <sub>4</sub> -Na	2,740
7	БРЭА	№.73		7,3	0.93	Cl-Mg	1,099
8	БРЭА	№.45		7,5	1.10	SO <sub>4</sub> -Na	3,827
9	БРЭА	№.28		7,3	1.08	SO <sub>4</sub> -Na	4,164
10	БРЭА	№.64		7,2	1.06	SO <sub>4</sub> -Na	7,040

В районе вадии эль Ариш (зона\_А) распространены в основном хлоридные магниевые воды по Сулину с коэффициентами метаморфизации, близкими к морским водам, что дает основания полагать, что воды, скорее всего, смешанного генезиса – поверхностные, нижележащих водоносных комплексов или современных морских интрузий из Средиземного моря. Воды зоны Бир-эль-Абд характеризуются коэффициентами

метаморфизации в основном больше 1 и сульфатным натриевым типом по Сулину, что, скорее всего, указывает на их инфильтрационное происхождение, а повышенная минерализация является результатом упаривания атмосферных осадков в условиях аридного климата. Воды зоны Рафах и Шейх Зувайид являются гидрокарбонатными натриевыми по Сулину, коэффициенты метаморфизации больше 1, что свидетельствует об их инфильтрационном происхождении.

Таким образом, полученные результаты не дают предпосылок к однозначному определению генезиса подземных вод в четвертичных отложениях, все типы вод, скорее всего, смешанного генезиса с преобладанием тех или иных процессов: внутригрунтового испарения, внедрения современных морских интрузий из Средиземного моря, перетока из нижележащих водоносных горизонтов. Кроме того, рассматриваемые воды являются результатом глубокой трансформации исходных вод того или иного генезиса, включая процессы осаждения-растворения горных пород и процессы ионного (катионного) обмена.

Для большинства скважин, для которых имелся полный набор гидрохимических показателей с использованием программы PHREEQC версии 3.5.0.14000 (разработка Геологической службы США – находится в свободном доступе в интернете) был выполнен расчет физико-химического равновесия в системе подземная вода – породообразующие минералы. В результате этих расчетов, учитывающих образование растворенных ассоциированных ионов и нейтральных ассоциатов на базе констант соответствующих реакций в гомогенной водной среде, были оценены индексы насыщения (SI), то есть степень насыщенности конкретного водного раствора (подземной воды) по отношению к различным породообразующим минералам.

$$SI = Lg (ПА) / Lg (ПР) \quad (2)$$

где ПА – произведение активностей (моляльных концентраций) растворенных в воде ионов, участвующих в равновесном процессе растворения-осаждения конкретного минерала; ПР – произведение растворимости: эмпирически установленная константа равновесного состояния данного минерала в водном растворе. При этом если величина SI близка к 0, то система (водный раствор) близка к насыщению к этому минералу. Если величина  $SI > 0$ , то подземная вода пересыщена по отношению к минералу, и этот минерал должен образовываться в виде твердой фазы (выпадать в осадок). Если величина  $SI < 0$ , то подземная вода недосыщена по отношению к минералу, и этот минерал должен растворяться.

В настоящем исследовании для водоносных горизонтов в четвертичных отложениях было рассмотрено равновесное состояние в карбонатной и сульфатной системах, то есть были оценены индексы насыщения по отношению к основным породообразующим карбонатным и сульфатным минералам: арагониту, кальциту, доломиту, магнезиту, гипсу и ангидриту для каждой из трёх опробованных зон А, ШР и БРЭА в отдельности. Оценка равновесности состояния могла быть произведена только при полном наборе проанализированных гидрохимических показателей. В соответствии с этим в зоне\_А был проанализирован материал по 40 скважинам, в зоне\_ШР - по 19 скважинам, в зоне\_БРЭА - по 41 скважине.

На рисунках 4.12-4.14 представлены корреляционные зависимости между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и индексом насыщения (SI) по отношению к кальциту для всех трёх зон А, ШР и БРЭА. Для остальных карбонатных минералов: арагонита, доломита и магнезита - картина приблизительно такая же.

Как видно на этих рисунках, индекс насыщения подземных вод в четвертичных отложениях по отношению к карбонатным минералам за пределами вадии Эль-Ариш в подавляющем большинстве случаев существенно меньше нуля (см. зоны ШР и БРЭА – рис. 4.13 и 4.14). И при этом практически отсутствует зависимость насыщенности от минерализации подземных вод.

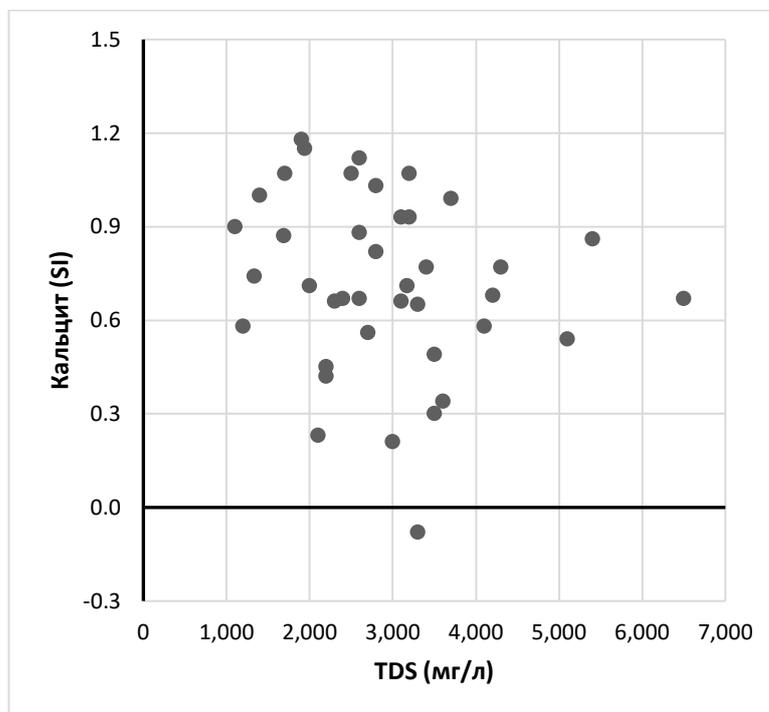


Рис. 4.12. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и индексом насыщения (SI) по отношению к кальциту для скважин в зоне\_А

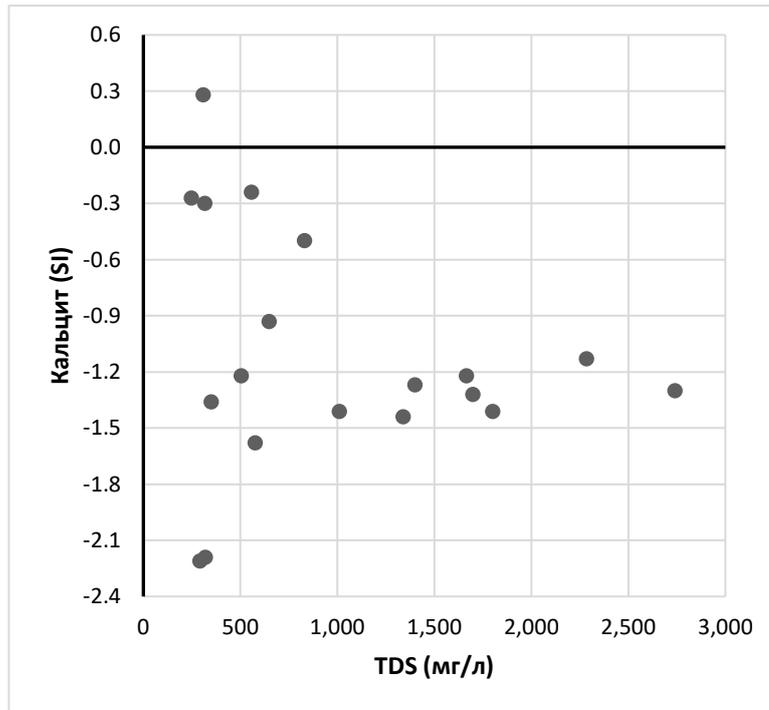


Рис. 4.13. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и индексом насыщения (SI) по отношению к кальциту для скважин в зоне ШР

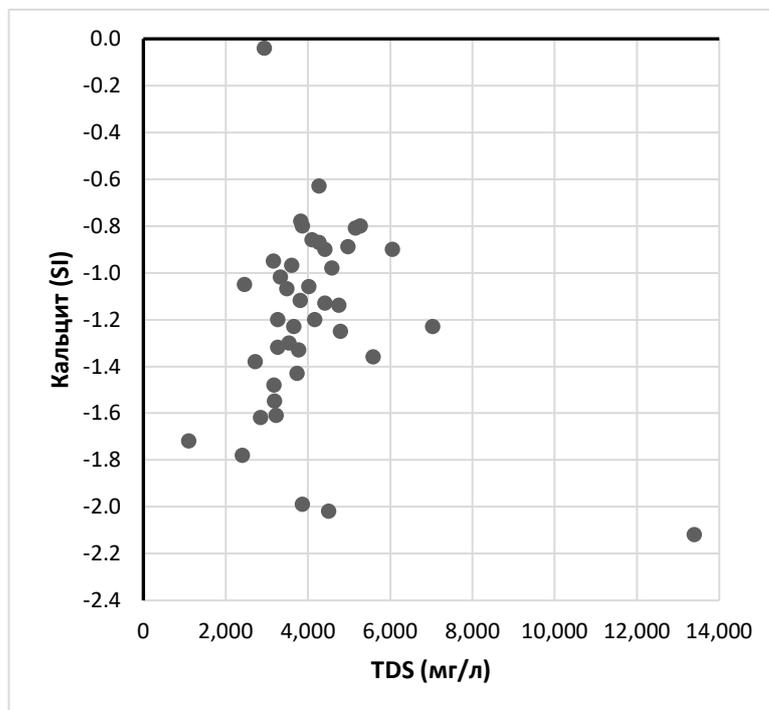


Рис. 4.14. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и индексом насыщения (SI) по отношению к кальциту для скважин в зоне БРЭА

Очевидно, в основной части прибрежной (к Средиземному морю) полосы развития четвертичных отложений, представленных

преимущественно песками и лишь частично отложениями куркара, в принципе возможное взаимодействие подземных вод с карбонатными минералами практически не проявляется в химическом равновесном составе. И, таким образом, при формировании химического состава вод преобладающее влияние оказывают инфильтрационное питание атмосферными осадками и/или интрузии морской воды из Средиземного моря. При этом даже относительно высокая в среднем величина испарения в аридном климате не приводит к насыщению подземных вод по отношению к карбонатным минералам. Вероятнее всего, это объясняется тем фактом, что в кратковременные паводковые периоды интенсивность инфильтрации атмосферных осадков в водоносные горизонты значительно превышает интенсивность испарения этих атмосферных осадков.

В районе Эль-Ариц (зона\_А), наоборот, подавляющее большинство подземных вод являются пересыщенными по отношению ко всем карбонатным минералам до SI, равного даже 1 и более (рис. 4.12), что неминуемо должно приводить к вторичному осаждению этих минералов в четвертичных отложениях. Зависимость насыщенности от минерализации подземных вод также практически отсутствует. Очевидно, что формирование этих вод определяется, в первую очередь, не инфильтрацией атмосферных осадков в паводковые периоды и не интрузиями соленых вод из Средиземного моря, а инверсионным питанием четвертичных водоносных горизонтов непосредственно из вади Эль-Ариш в периоды половодий, когда отметка уреза воды в водотоке значительно превышает отметки уровней подземных вод в прилегающих областях, вплоть до затопления этих территорий (отмечалось выше). При этом химический состав воды, протекающей по вади в эти периоды, очевидным образом, формируется значительно выше по течению – в пределах развития дочетвертичных отложений. Это подтверждается и значениями коэффициентов метаморфизации, и генетическим типом вод по Сулину.

Сколько-нибудь очевидной зависимости между индексом насыщения подземных вод по отношению к карбонатным минералам и глубиной отбора проб (в пределах порядка 120 метров) не наблюдается ни в целом на территории прибрежной полосы, в зонах ШР и БРЭА, ни в районе вади Эль-Ариш (зона\_А).

Зато, совершенно закономерно, наблюдается прямая зависимость степени насыщенности подземных вод по отношению ко всем карбонатным минералам от величины рН для всех трёх рассматриваемых зон А, ШР и БРЭА. На рисунках 4.15-4.17, для примера, представлены эти корреляционные зависимости для SI по отношению к кальциту. Общеизвестно, что при увеличении значений рН (при уменьшении кислотности водного раствора) равновесие между растворимыми карбонатными ассоциированными ионами и нейтральными ассоциатами в ряду  $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{CO}_3^0 - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$  («карбонатная система») смещается в сторону образования последнего. И именно это и приводит к увеличению степени насыщенности водных растворов по отношению ко всем карбонатным минералам.

На рисунках 4.18-4.20 представлены корреляционные зависимости между минерализацией (TDS, мг/л) и индексом насыщения (SI) по отношению к гипсу для всех трёх зон А, ШР и БРЭА. Для другого сульфатного минерала - ангидрита – график аналогичный. Как видно на этих рисунках, во всех трёх рассматриваемых зонах индекс насыщения подземных вод в четвертичных отложениях по отношению к сульфатным минералам во всех пробах существенно меньше нуля. Но при этом, в отличие от ситуации с карбонатными минералами, имеется определенная тенденция к увеличению степени насыщенности по мере возрастания минерализации подземных вод, что находится в согласии с отмеченным

выше фактом увеличения содержаний сульфатов в подземных водах при увеличении минерализации (рис. 4.3б, 4.4б и 4.5б).

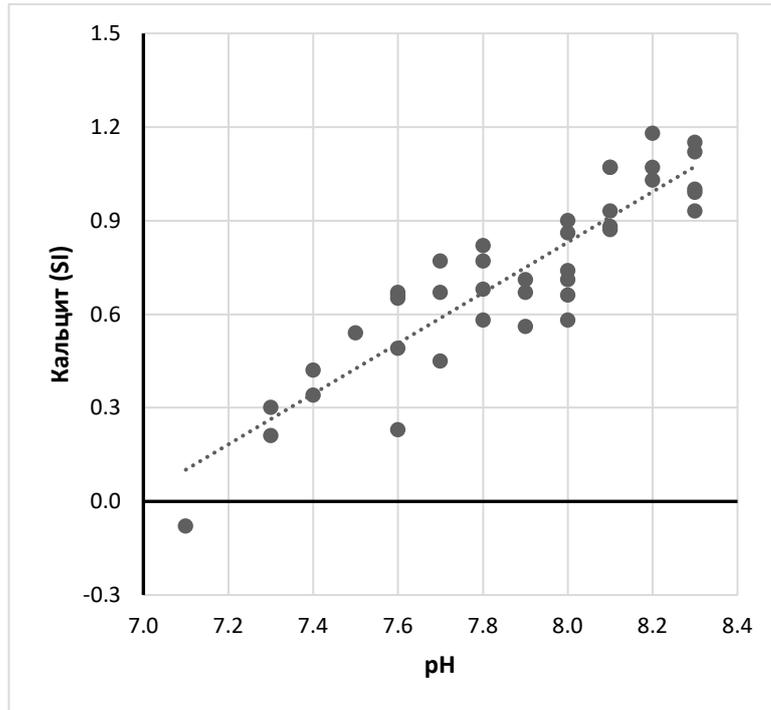


Рис. 4.15. Корреляционная зависимость между величиной **pH** и **индексом насыщения (SI)** по отношению к **кальциту** для скважин в зоне **\_А**

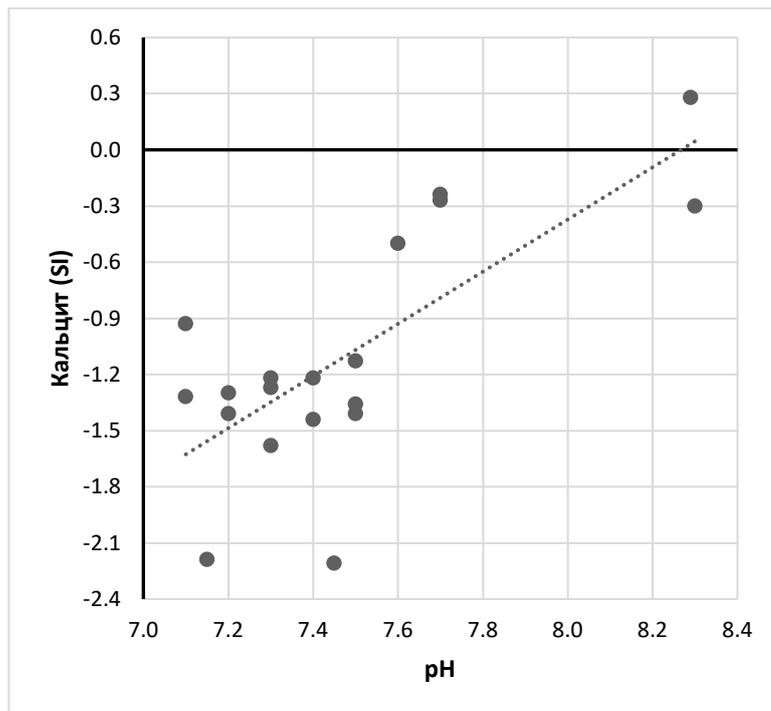


Рис. 4.16. Корреляционная зависимость между величиной **pH** и **индексом насыщения (SI)** по отношению к **кальциту** для скважин в зоне **\_ШР**

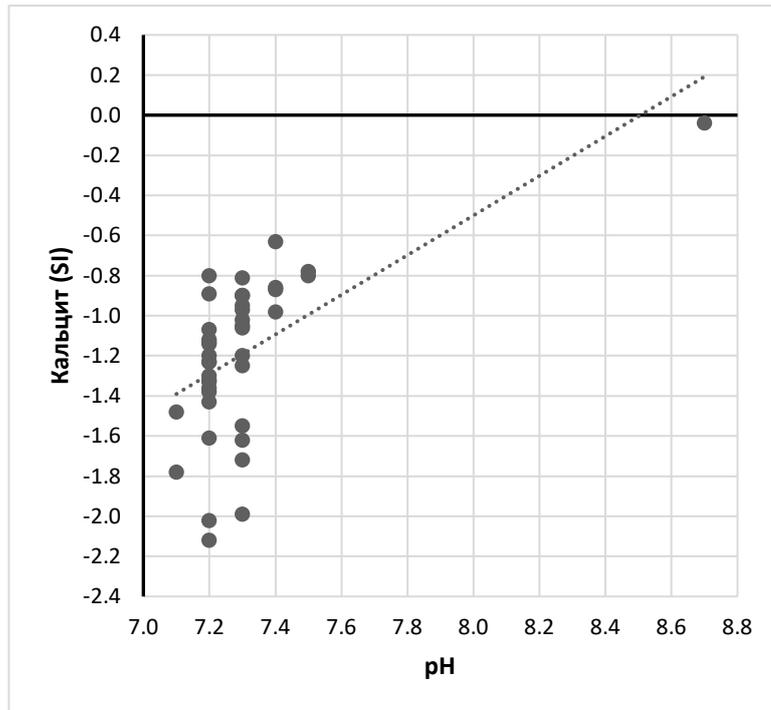


Рис. 4.17. Корреляционная зависимость между величиной **pH** и **индексом насыщения (SI)** по отношению к **кальциту** для скважин в зоне\_БРЭА

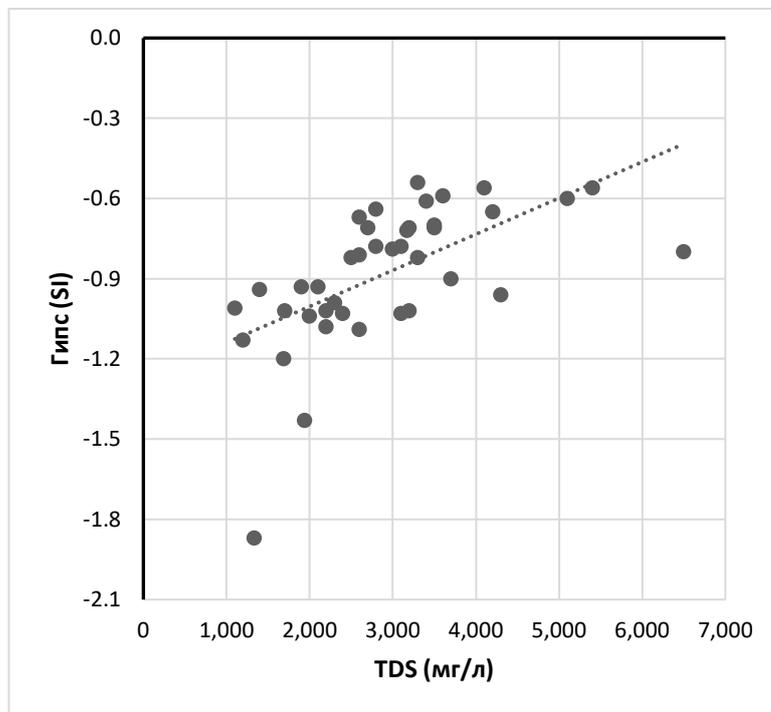


Рис. 4.18. Корреляционная зависимость между **минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>)** и **индексом насыщения (SI)** по отношению к **гипсу** для скважин в зоне\_А

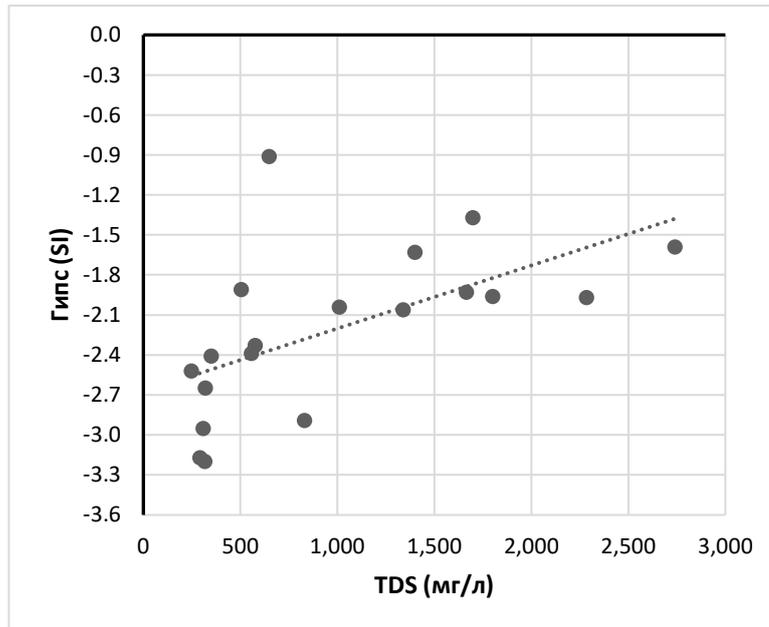


Рис. 4.19. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и **индексом насыщения** (SI) по отношению к **гипсу** для скважин в зоне III

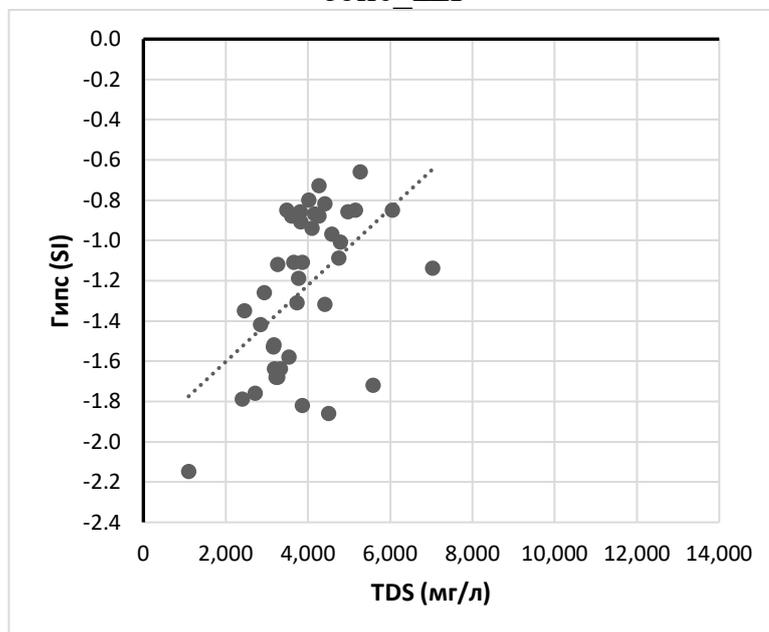


Рис. 4.20. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и **индексом насыщения** (SI) по отношению к **гипсу** для скважин в зоне БРЭА

В четвертичных отложениях, представленных либо сугубо терригенными песками и гравием, либо карбонатизированными отложениями куркара, в составе породообразующих отсутствуют сульфатные минералы, растворение которых могло бы привести к росту концентрации сульфатов и, соответственно, к высоким значениям индекса

насыщения подземных по отношению к гипсу и ангидриту. Поэтому описанная ситуация является вполне закономерной. При этом следует констатировать, что степень метаморфизации природных вод при упаривании атмосферных осадков далеко не достигает того уровня, когда наступает насыщение воды по отношению к сульфатным минералам. Это также следует считать закономерным, так как, как указывалось выше, степень упаривания атмосферных осадков на севере Синая не достигает даже уровня насыщения по отношению к гораздо менее растворимым карбонатным минералам.

Вероятно, источником повышенных концентраций сульфатов в подземных водах в четвертичных отложениях являются либо упаривание инфильтрующихся атмосферных осадков, либо воды, развитые в дочетвертичных породах, которые поступают в четвертичные отложения за счет субвертикального перетока снизу вверх или при описанном выше процессе оттока воды из вади в водоносные горизонты в паводковые периоды.

#### **4.2. Водоносные горизонты дочетвертичных отложений**

Условия развития водоносных горизонтов в дочетвертичных отложениях подробно описаны в предыдущей главе 2. Преимущественное развитие в составе коренных пород получили различные по возрасту (в основном палеогеновые, позднемеловые, раннемеловые и юрские) известняки и песчаники.

Главной проблемой использования подземных вод дочетвертичных водоносных горизонтов, как и водоносных горизонтов в четвертичных отложениях, на Северном Синае является их высокая соленость.

Качество подземных вод, залегающих даже в самых верхних горизонтах, является довольно низким: их минерализация колеблется в диапазоне 1400-5500 мг/л. Породообразование шло в основном в прибрежных континентальных и шельфовых условиях. Предполагается, что

соленая вода, изначально попавшая во вмещающие породы, разбавлялась инфильтрующимися атмосферными осадками во время плиоцена и, естественно, продолжает разбавляться в настоящее время.

Для уточнения генезиса вод дочетвертичных отложений в некоторых анализах воды были определены коэффициенты метаморфизации ( $rNa/rCl$ ) [6] и тип воды по В.А.Сулину [6] (табл. 4.10).

Таблица 4.10- Значения генетических коэффициентов для некоторых скважин, вскрывших дочетвертичные отложения

№ пп	Наименование	Глубина скважины, м	Водоносный горизонт	pH	$rNa/rCl$	по Сулину	М общ, г/дм <sup>3</sup>
1	Sudr El-Heitan	1025	K1	7,00	1,19	SO <sub>4</sub> -Na	1,246
2	Sheira-1	804	K1	7.50	0.91	Cl-Mg	1,575
3	J No.16 Эль Брук 1	799	K1	7.00	1,05	HCO <sub>3</sub> -Na	2,318
4	J No.19 Ариф эль Нага	900	K1	7.10	1,05	HCO <sub>3</sub> -Na	3,008
5	No. 5 шахта	215	K1	7.00	0,62	Cl-Mg	4,700
6	Нехль-1	1,020	K1	8.10	1.00	Cl-Mg	1,344
7	Nekhl-2	1,095	K1	8.00	0.82	Cl-Mg	1,280
8	Nekhl-5	1,150	K1	7.90	0.79	Cl-Mg	1,408
9	Hassana-2	1,241	K1	8.00	0.65	Cl-Ca	2,989
10	Hassana-4	1,045	K1	7.40	0.61	Cl-Ca	3,078
11	Ариф эль Нага	902	K1	7.70	0.70	Cl-Mg	0,356
12	El-Halal deep	800	K1	7.80	0.79	Cl-Mg	2,739
13	El-Halal medium	170	K1	7.70	0.58	Cl-Mg	3,180
14	No.53B EL-Arish-18	180	K2+Pg	7.00	1.99	HCO <sub>3</sub> -Na	0,950
15	No.54A EL-Fath-4	249	K2+Pg	7.00	1.67	SO <sub>4</sub> -Na	2,200
16	No.53A EL-Arish-18	158	K2+Pg	7.00	1.09	SO <sub>4</sub> -Na	3,810
17	No.63A Libni-1	300	K2+Pg	7.30	0.78	Cl-Ca	4,500
18	No.50 El - ArishNo.15	295	K2+Pg	7.30	0.97	Cl-Mg	7,000

В водоносных горизонтах верхнего мела-палеогена значения минерализации колеблются в чуть большем диапазоне – 1100-7000 мг/дм<sup>3</sup>. Многими авторами предполагается, что соленая вода была исходно

захоронена в породах в период осадконакопления (седиментогенные воды), и затем она разбавлялась или замещалась относительно пресными водами инфильтрационного генезиса. Такое происхождение подземных вод верхнемеловых известняков подтверждается наличием, а некоторых точках опробования гидрокарбонатно-натриевых и сульфатно-натриевых вод по Сулину с коэффициентами метаморфизации больше 1. Наиболее интенсивно процессы замещения протекали, вероятно, в тех районах, где хорошо развиты трещины, приуроченные к разрывным нарушениям.

Минерализация подземных вод в водоносном горизонте нижнемеловых (нубийских) песчаников изменяется приблизительно в том же диапазоне, что и в верхнемеловых подземных водах: 1200-5700 мг/л. Некоторыми исследователями предполагается, что в тех случаях, когда отложения нижнего мела залегают не первыми от поверхности, содержащиеся в них исходно седиментогенные воды находятся в «застойном» состоянии (зона весьма затрудненного водообмена). Хотя отсутствие зафиксированных минерализаций выше 6000 мг/л позволяет однозначно утверждать, что и в этих условиях имеет место инфильтрационное разбавление атмосферными осадками. Это подтверждается и изотопными данными [8], согласно которым воды некоторых точек опробования нубийских песчаников являются слегка «обедненными» изотопами дейтерия и O-18, то есть в холодные геологические эпохи происходило разбавление исходной воды, тогда как по классификации Сулина большинство вод являются хлоридными магниевыми и хлоридными кальциевыми, а коэффициенты метаморфизации близки к таковым для морских вод или ниже.

Минерализация проб воды из скважин, вскрывающих достаточно локально развитый водоносный горизонт в известняках юры, не имеющий

практического значения, опять-таки колеблется в приблизительно тех же пределах: от 950 до 4700 мг/л.

Замечено, что в скважинах, оборудованных на верхнемеловые известняки и нубийские песчаники и характеризующихся наиболее высокими дебитами, минерализация более низкая, но быстро увеличивается после начала откачки. Данный факт свидетельствует о том, что в локальных зонах развития коренных пород с повышенной проницаемостью (повышенной трещиноватостью в пределах и вблизи разломов), то есть в наиболее «промытых» атмосферными осадками, минерализация понижена. Но в соседствующих с этими локальными зонами ненарушенных блоках пород интенсивность инфильтрационного разбавления гораздо ниже.

В качестве выборок для статистических оценок были определены два основных водоносных горизонта, развитые практически на всей территории Северного Синая: 1) верхнемеловые-палеогеновые известняки – по 63 скважинам и 2) нижнемеловые (нубийские) песчаники – по 61 скважине. Статистические оценки распределения значений, указанных в начале настоящей главы гидрохимических показателей подземных вод произведены также с помощью программы SPSS; построены различные корреляционные зависимости. Как и в случае с подземными водами в четвертичных отложениях, в качестве переменных («выборочных» значений) рассматривались: минерализация (TDS) в размерности мг/дм<sup>3</sup> (ppm), концентрации всех указанных выше растворенных макрокомпонентов в мг-экв/дм<sup>3</sup> (epm) и в %-экв (% epm), величина рН в ед. рН, а также глубины опробованных скважин (ds) в метрах.

В таблице 4.11 представлены результаты статистической обработки по обоим указанным выше выборкам по величине минерализации подземных вод в размерности мг/дм<sup>3</sup>; в таблице 4.12 - результаты статистической обработки для величины рН в ед. рН; а в таблицах 4.13-4.18

- результаты статистической обработки тех же выборок для концентраций макрокомпонентов  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$  в %-экв, соответственно. Кроме двух указанных выборок для известняков и песчаников во всех этих таблицах представлены также характеристики по генеральной совокупности для всех подземных вод в дочетвертичных отложениях («Дочетв. в целом»).

Таблица 4.11- Статистические параметры для распределения значений минерализации (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) в различных зонах развития водоносных горизонтов в дочетвертичных отложениях

Параметр	Дочетв. в целом	Известняк K <sub>2</sub> +Pg	Песчаник K <sub>1</sub>
N	124	63	61
среднее	3353	3658	3037
медиана	3255	4000	2973
станд. откл.	1367	1335	1338
минимум	892	892	1200
максимум	7000	7000	5768

Таблица 4.12- Статистические параметры для распределения величины рН (ед. рН) в различных зонах развития водоносных горизонтов в дочетвертичных отложениях

Параметр	Дочетв. в целом	Известняк K <sub>2</sub> +Pg	Песчаник K <sub>1</sub>
N	92	33	55
среднее	7,2	7,2	7,1
медиана	7,1	7,1	7,1
станд. откл.	0,4	0,4	0,4
минимум	6,1	6,2	6,1
максимум	8,2	7,9	8,2

Таблица 4.13- Статистические параметры для распределения концентрации  $\text{HCO}_3$  (%-экв) в различных зонах развития водоносных горизонтов в дочетвертичных отложениях

Параметр	Дочетв. в целом	Известняк $\text{K}_2+\text{Pg}$	Песчаник $\text{K}_1$
N	21	15	6
среднее	9	8	10,5
медиана	5,5	5,5	9
станд. откл.	9	9	9
минимум	0	0,94	0
максимум	29,3	29,3	24,5

Таблица 4.14- Статистические параметры для распределения концентрации  $\text{SO}_4$  (%-экв) в различных зонах развития водоносных горизонтов в дочетвертичных отложениях

Параметр	Дочетв. в целом	Известняк $\text{K}_2+\text{Pg}$	Песчаник $\text{K}_1$
N	21	15	6
среднее	24	24	24
медиана	22	21,5	28,5
станд. откл.	15,5	15	17,5
минимум	1,3	1,3	2,0
максимум	56,6	56,6	43,1

Таблица 4.15- Статистические параметры для распределения концентрации  $\text{Cl}$  (%-экв) в различных зонах развития водоносных горизонтов в дочетвертичных отложениях

Параметр	Дочетв. в целом	Известняк $\text{K}_2+\text{Pg}$	Песчаник $\text{K}_1$
N	21	15	6
среднее	67,5	68	65,5
медиана	69	75	64
станд. откл.	17	18	15,5
минимум	37,2	37,2	46,6
максимум	93,2	93,2	85,6

Таблица 4.16- Статистические параметры для распределения концентрации **Mg** (%-экв) в различных зонах развития водоносных горизонтов в дочетвертичных отложениях

Параметр	Дочетв. в целом	Известняк K <sub>2</sub> +Pg	Песчаник K <sub>1</sub>
N	21	15	6
среднее	16,5	14,5	23,5
медиана	15,5	14	27,5
станд. откл.	9,5	8,5	10
минимум	0,4	0,4	10,6
максимум	32,3	31,5	32,3

Таблица 4.17- Статистические параметры для распределения концентрации **Ca** (%-экв) в различных зонах развития водоносных горизонтов в дочетвертичных отложениях

Параметр	Дочетв. в целом	Известняк K <sub>2</sub> +Pg	Песчаник K <sub>1</sub>
N	21	15	6
среднее	19,5	21,5	16
медиана	19,5	19,5	16,5
станд. откл.	11,5	12	11,5
минимум	0,78	0,78	3,9
максимум	45,7	45,7	27,7

Таблица 4.18- Статистические параметры для распределения концентрации **Na** (%-экв) в различных зонах развития водоносных горизонтов в дочетвертичных отложениях

Параметр	Дочетв. в целом	Известняк K <sub>2</sub> +Pg	Песчаник K <sub>1</sub>
N	21	15	6
среднее	63	64	60,5
медиана	60,5	60,5	55,0
станд. откл.	15,5	13,5	21
минимум	39,8	39,8	41,1
максимум	97,4	97,4	85,5

Принципиальных различий в статистических параметрах распределения различных показателей химического состава подземных вод для указанных двух выборок: известняки и песчаники не наблюдается. И в известняках, и в песчаниках развиты как практически пресные (около 1 г/дм<sup>3</sup>), так и солоноватые, околонейтральные или слабощелочные подземные воды в среднем сульфатно-хлоридные преимущественно натриевые (раже кальциево-натриевые). То есть по химическому составу подземные воды в дочетвертичных отложениях мало чем отличаются от подземных вод, развитых в четвертичных отложениях.

Обращает на себя внимание тот факт, что даже минимальные значения минерализации и в известняках, и в песчаниках составляют не менее 0,9 г/дм<sup>3</sup>. Это однозначно свидетельствует о том, что даже в тех точках, где генетически формирование подземных вод в дочетвертичных отложениях обусловлено только инфильтрацией атмосферных осадков (а это, по-видимому, точки с коэффициентами метаморфизации больше 1 и гидрокарбонатными и сульфатными натриевыми водами по Сулину), эти осадки претерпели физико-химическую трансформацию за счет упаривания либо на поверхности земли, либо в пределах зоны аэрации или в верхних обводненных слоях (верховодка).

На рисунках 4.21–4.22 представлены графики корреляционных зависимостей между минерализацией подземных вод (TDS) и глубиной опробованной скважины (ds) для обеих выборок известняки и песчаники, соответственно. Как видно на этих рисунках, однозначной зависимости в данных координатах, как и для подземных вод в четвертичных отложениях, ни по одной из выборок не наблюдается.

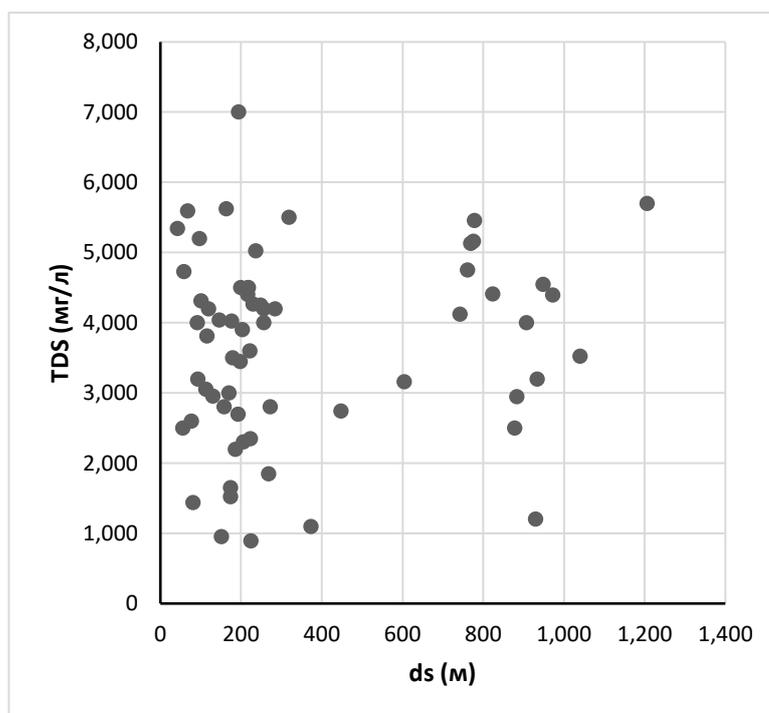


Рис. 4.21. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и **глубиной скважины** (ds, м) для скважин, оборудованных на известняки

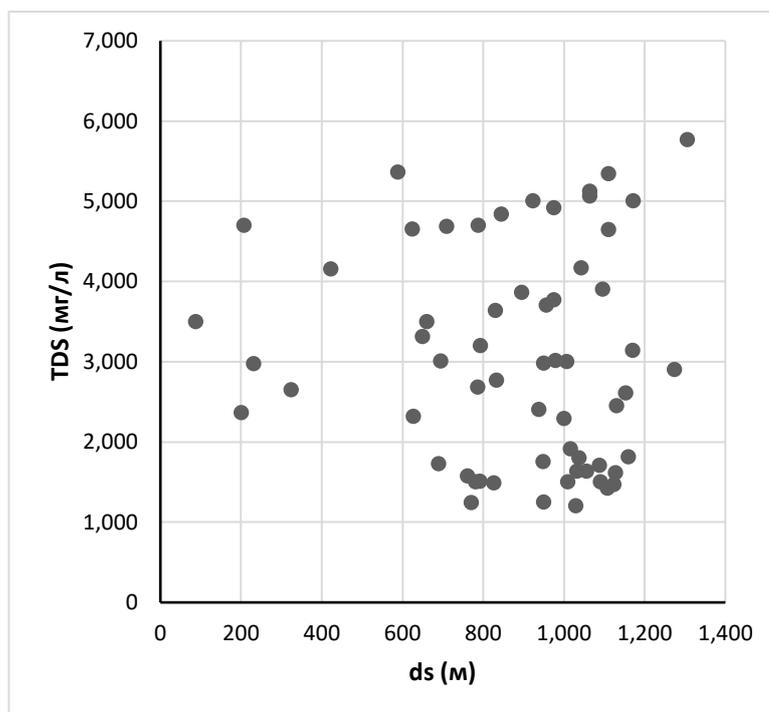


Рис. 4.22. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и **глубиной скважины** (ds, м) для скважин, оборудованных на песчаники

Для обеих выборок известняк и песчаник также были построены корреляционные зависимости между минерализацией (TDS) и

концентрациями всех макрокомпонентов в мг-экв/дм<sup>3</sup>. На рисунках 4.23 *а*, *б*, *в* для известняков, 4.24 *а*, *б*, *в* для песчаников представлены соответствующие графики для Cl, SO<sub>4</sub> и Na, где, как и для подземных вод в четвертичных отложениях, однозначно проявляется прямая линейная зависимость между минерализацией и концентрациями Cl и Na и менее однозначно - содержаниями SO<sub>4</sub>. Для остальных макрокомпонентов – HCO<sub>3</sub>, Mg и Ca, никакой существенной зависимости не наблюдается ни в одном из двух водоносных горизонтов.

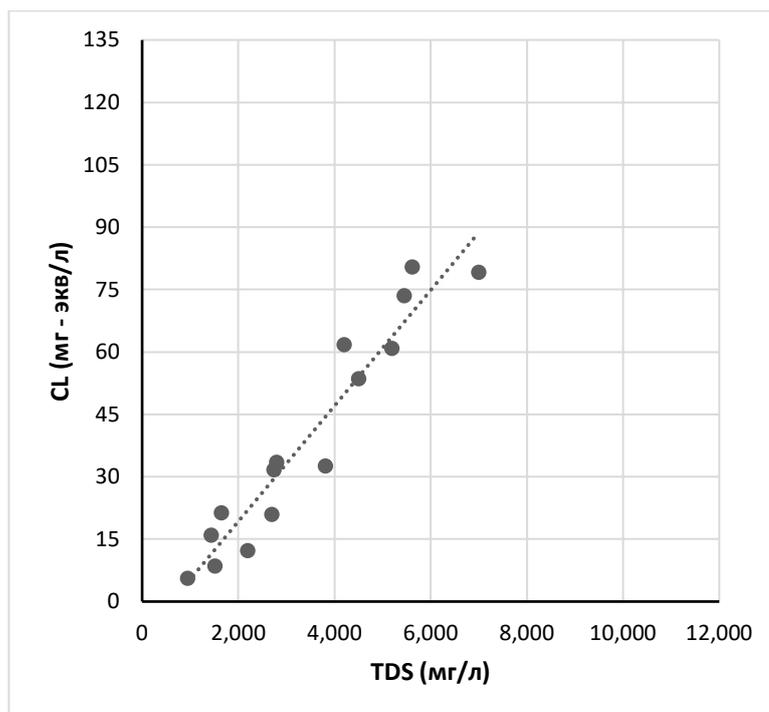


Рис. 4.23,*а*. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией Cl<sup>-</sup> (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин, оборудованных на известняки

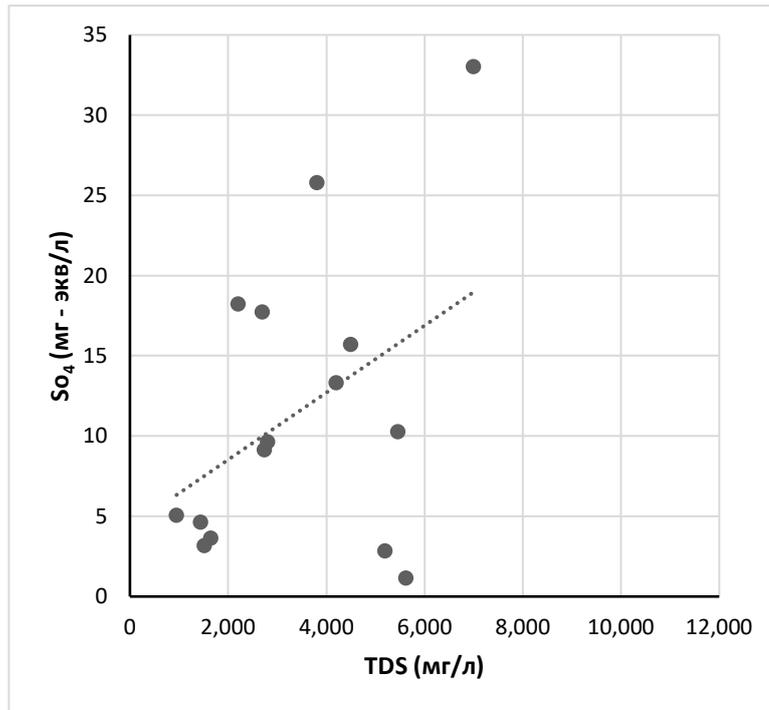


Рис. 4.23,б. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией **SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>** (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин, оборудованных на известняки

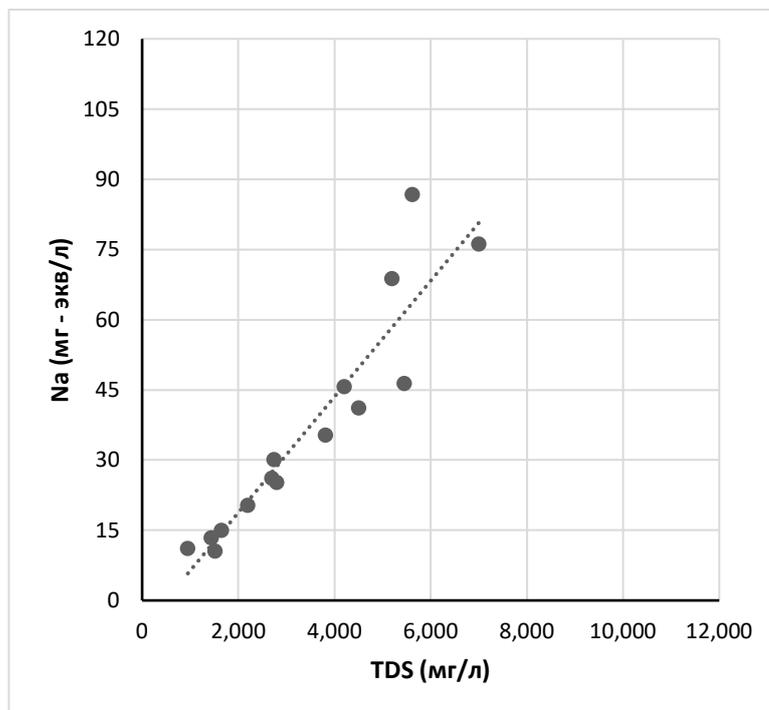


Рис. 4.23,в. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией **Na<sup>+</sup>** (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин, оборудованных на известняки

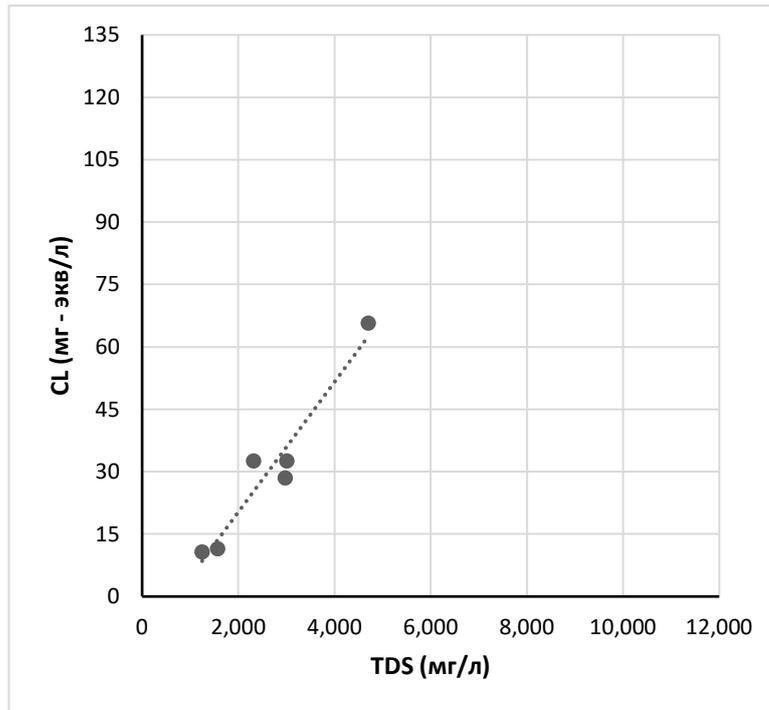


Рис. 4.24,а. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией **Cl<sup>-</sup>** (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин, оборудованных на песчаники

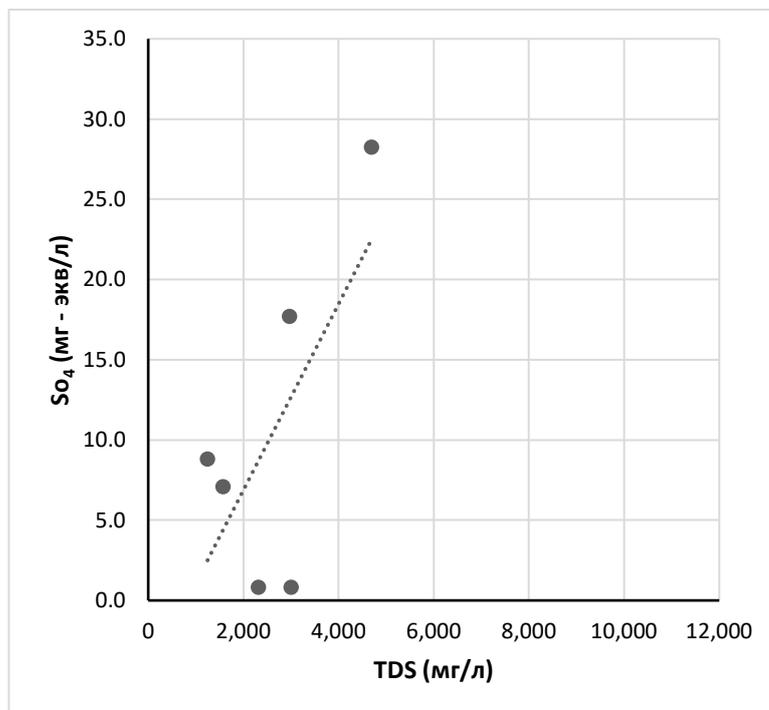


Рис. 4.24,б. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией **SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>** (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин, оборудованных на песчаники

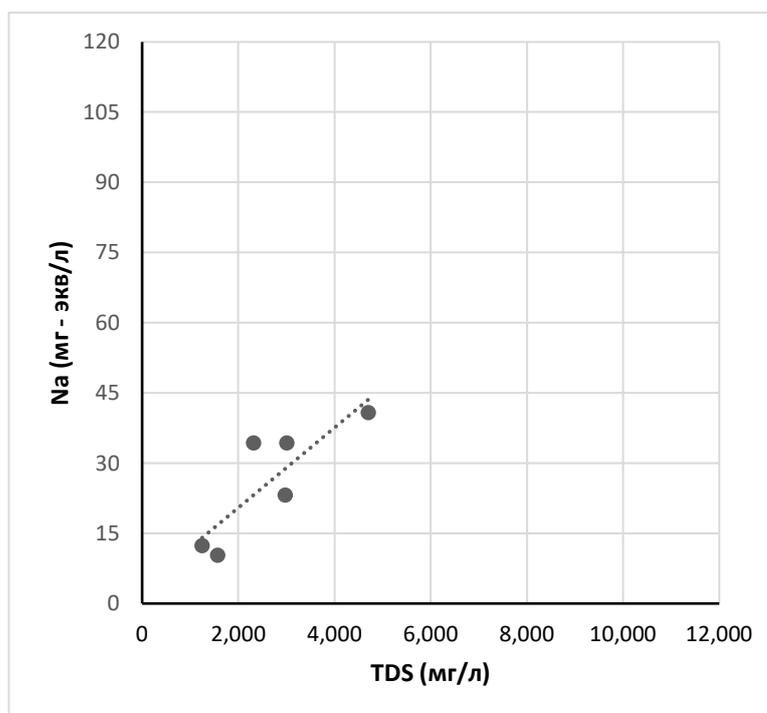


Рис. 4.24,в. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрацией **Na<sup>+</sup>** (мг-экв/дм<sup>3</sup>) для скважин, оборудованных на песчаники

Таким образом, как и в подземных водах четвертичных отложений, в соответствии с соотношениями %-эквивалентных концентраций макрокомпонентов (см. табл. 4.13-4.18), основным анионом, определяющим минерализацию подземных вод в водоносных горизонтах дочетвертичных отложений – и в известняках, и в песчаниках (по крайней мере в солоноватых водах с минерализацией существенно большей 1 г/дм<sup>3</sup>) является Cl<sup>-</sup> (при дополнительном влиянии SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), а основным катионом – Na<sup>+</sup>.

На рисунках 4.25 и 4.26 представлены корреляционные зависимости между минерализацией (TDS) и %-эквивалентными концентрациями всех макрокомпонентов для верхнемеловых известняков и нубийских песчаников, соответственно. На этих рисунках видно, что в каждой из двух выборок намечается тенденция к росту процентных содержаний в подземных водах Cl и Na, и наоборот, к снижению процентных содержаний Ca, Mg, SO<sub>4</sub> и HCO<sub>3</sub> по мере увеличения минерализации. То есть, ещё раз можно сказать, что основными макрокомпонентами, определяющим

минерализацию соленоватых подземных вод в водоносных горизонтах дочетвертичных отложений являются  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  (как и в четвертичных отложениях).

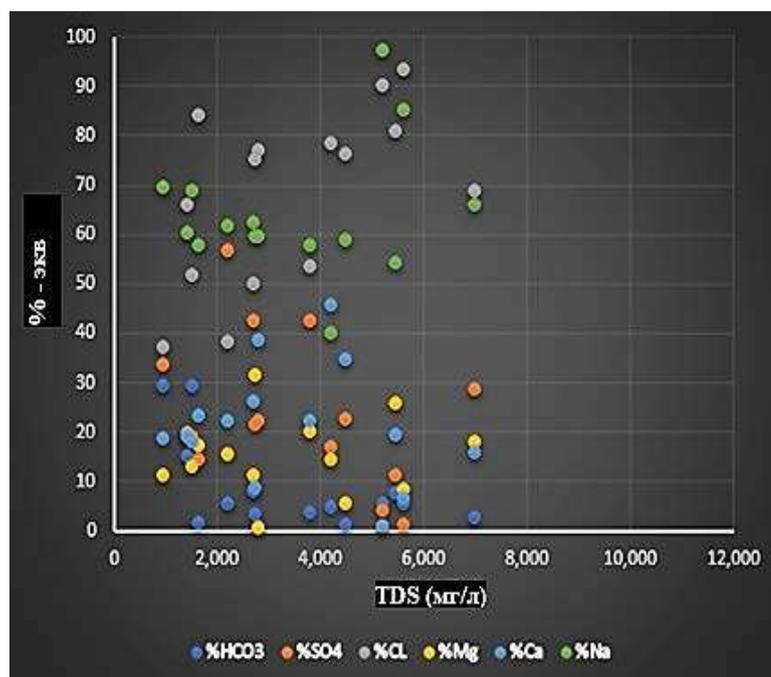


Рис. 4.25. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрациями макрокомпонентов (в %-экв) для скважин в известняках

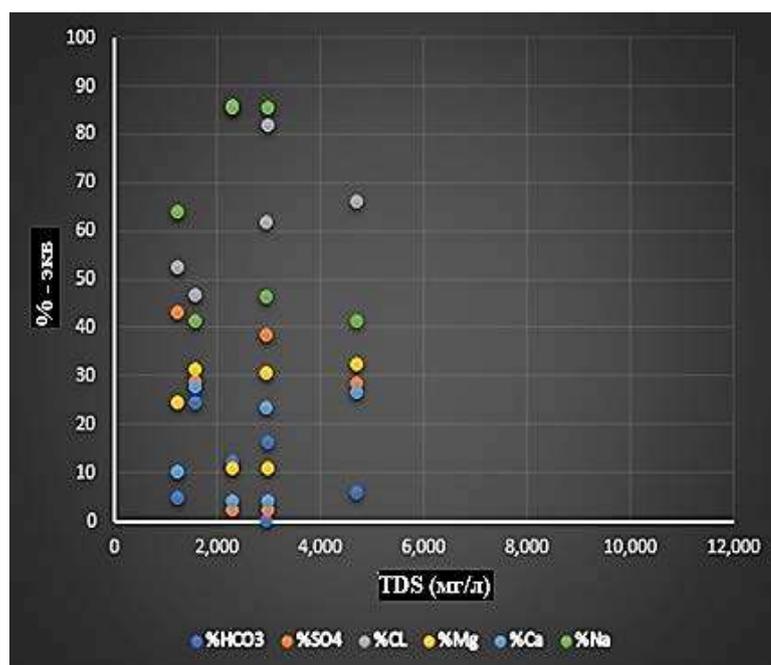


Рис. 4.26. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и концентрациями макрокомпонентов (в %-экв) для скважин в песчаниках

Корреляционные зависимости между значениями минерализации (TDS) и величиной рН для известняков и песчаников представлены на рисунках 4.27 и 4.28. Как и для вод четвертичных отложений, однозначной корреляционной зависимости в данных координатах для дочетвертичных водоносных горизонтов не наблюдается. То есть формирование кислотности среды подземных вод является многофакторным процессом и зависит как от интенсивности инфильтрационного или иного питания горизонтов, так и от специфики взаимодействий в системе вода-порода на каждом из отдельных участков опробования.

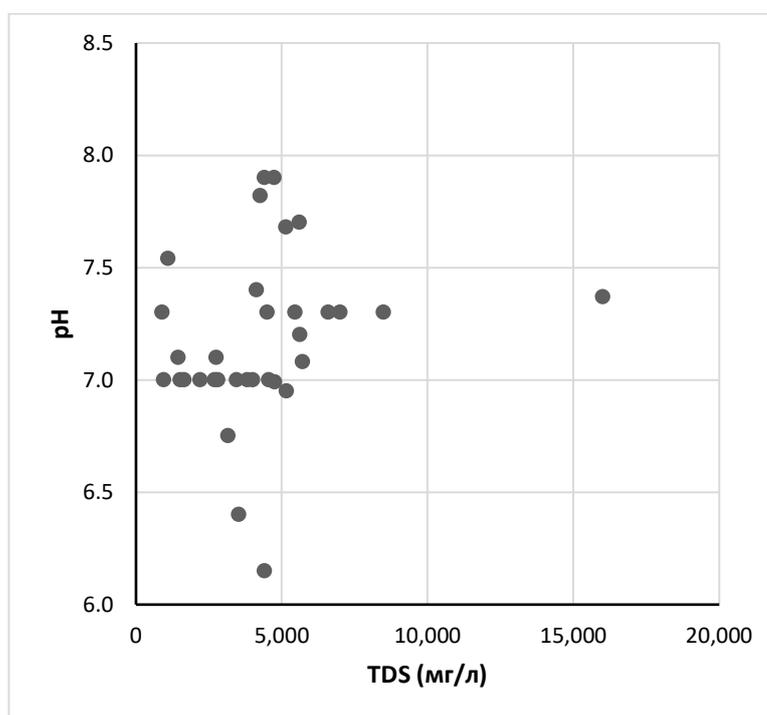


Рис. 4.27. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и величиной **рН** для скважин, оборудованных на известняки

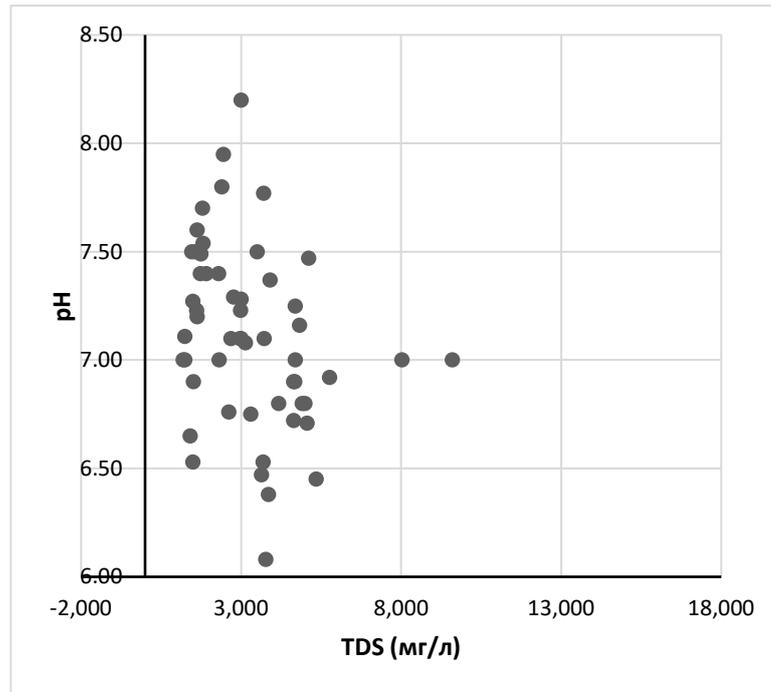


Рис. 4.28. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и величиной **pH** для скважин, оборудованных на песчаники

Также были построены графики зависимостей от минерализации различных генетических коэффициентов по соотношениям концентраций:  $R_{\text{equ}}$  (см. п. 3.1);  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ;  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ ;  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ , на которых какой-то однозначной корреляции не наблюдается. Как и для четвертичных отложений, значения генетических коэффициентов варьируют в широких пределах, не позволяя однозначно определить генезис вод: или седиментогенные, или за счет упаривания атмосферных осадков. Воды верхнемеловых известняков характеризуются в основном коэффициентами метаморфизации больше 1 и сульфатным или гидрокарбонатно-натриевым типом по Сулину, что указывает на тесную связь с инфильтрационными водами. Но в некоторых точках зафиксированы хлоридные магниевые, и даже кальциевые воды по Сулину. Скорее всего, это воды смешанного генезиса с существенной долей седиментационных вод. Воды нубийских песчаников также характеризуются разнообразием генетических типов, но преобладает хлоридный магниевый тип по Сулину, то есть доля

инфильтрационных вод низка, кроме точек, расположенных в области питания.

Таким образом, воды дочетвертичных отложений являются результатом трансформации исходных вод разного генезиса в сочетании с процессами осаждения-растворения породообразующих минералов, катионного обмена и взаимного перетекания.

Для скважин, оборудованных на дочетвертичные отложения, для которых имелся полный набор проанализированных гидрохимических показателей, с использованием программы PHREEQC был выполнен расчет физико-химического равновесия в системе подземная вода – породообразующие минералы. В результате этих расчетов, как и для подземных вод в четвертичных отложениях, и для известняков, и для песчаников были оценены индексы насыщения (SI) по отношению к основным породообразующим карбонатным и сульфатным минералам: арагониту, кальциту, доломиту, магнезиту, гипсу и ангидриту. Всего для известняков (LS) были выполнены расчеты по 13 скважинам, а для песчаников (SS) - по 9 скважинам.

На рисунках 4.29-4.30 представлены корреляционные зависимости между минерализацией (TDS, мг/л) и индексом насыщения (SI) по отношению к кальциту для известняков и песчаников соответственно. Для остальных карбонатных минералов: арагонита, доломита и магнезита – картина приблизительно такая же. Индекс насыщения подземных вод во всех дочетвертичных отложениях по отношению к карбонатным минералам колеблется в очень широком диапазоне от  $-2,5 \div -1,5$  до  $+0,5 \div +0,8$ . То есть подземные воды в дочетвертичных отложениях могут быть как недонасыщенными, так и пересыщенными по отношению к карбонатным минералам (вне зависимости от минерального состава водовмещающих горных пород), что, очевидно, свидетельствует о наличии различных

условий формирования вод на различных опробованных участках. Вероятнее всего, современный химический состав этих подземных вод обусловлен смешением в различных пропорциях исходных соленых седиментогенных вод и инфильтрационных вод с учетом их упаривания в аридном климате, а также перетоками из одних водоносных горизонтов в другие и процессами ионного (катионного) обмена.

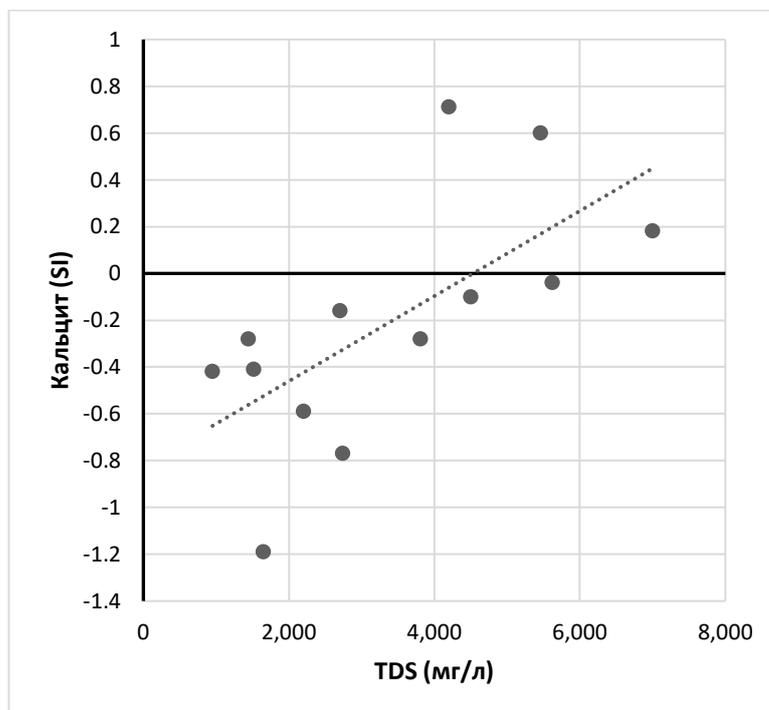


Рис. 4.29. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и индексом насыщения (SI) по отношению к кальциту для скважин, оборудованных на известняки

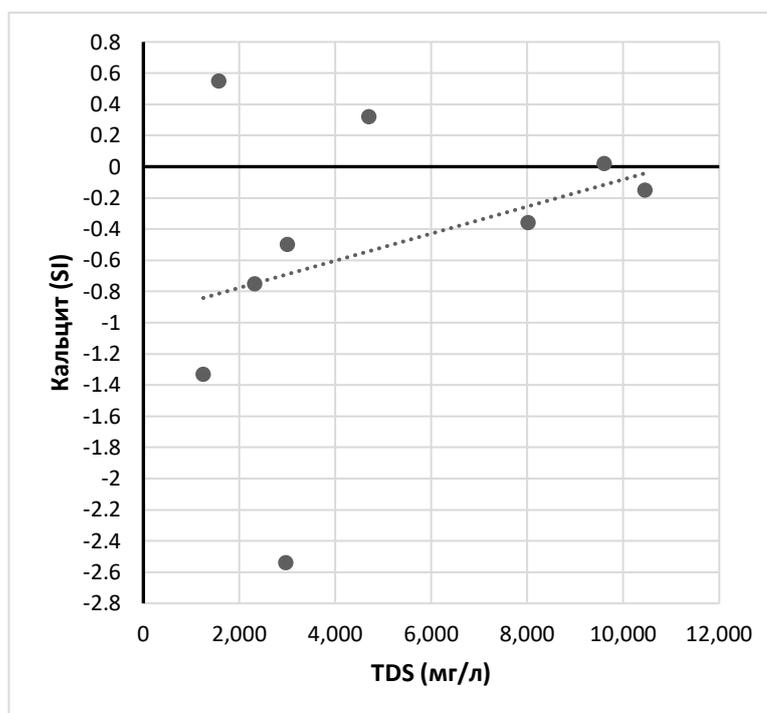


Рис. 4.30. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и **индексом насыщения (SI)** по отношению к **кальциту** для скважин, оборудованных на песчаники

При этом, по крайней мере, в подземных водах, развитых в известняках, отмечается тенденция к увеличению индекса насыщения (SI) по отношению к карбонатным минералам по мере нарастания минерализации. Вследствие того, что инфильтрующиеся атмосферные осадки являются недонасыщенными по отношению к карбонатным минералам, чем меньше степень разбавления ими исходных седиментогенных вод, тем больше степень насыщения смешанных подземных вод по отношению к карбонатам.

Сколько-нибудь очевидной зависимости между индексом насыщения подземных вод по отношению к карбонатным минералам и глубиной отбора проб в дочетвертичных отложениях не наблюдается ни в песчаниках, ни в известняках.

При этом, закономерно, наблюдается прямая зависимость (по крайней мере, для известняков) степени насыщенности подземных вод по отношению ко всем карбонатным минералам от величины рН. На рисунках

4.31-4.32, для примера, представлены эти корреляционные зависимости для SI по отношению к кальциту. Как уже указывалось при рассмотрении вод дочетвертичных отложений, при увеличении значений pH равновесие между растворимыми карбонатными ассоциированными ионами и нейтральными ассоциатами в ряду  $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{CO}_3^0 - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$  («карбонатная система») смещается в сторону образования последнего, что и приводит к увеличению степени насыщенности водных растворов по отношению ко всем карбонатным минералам.

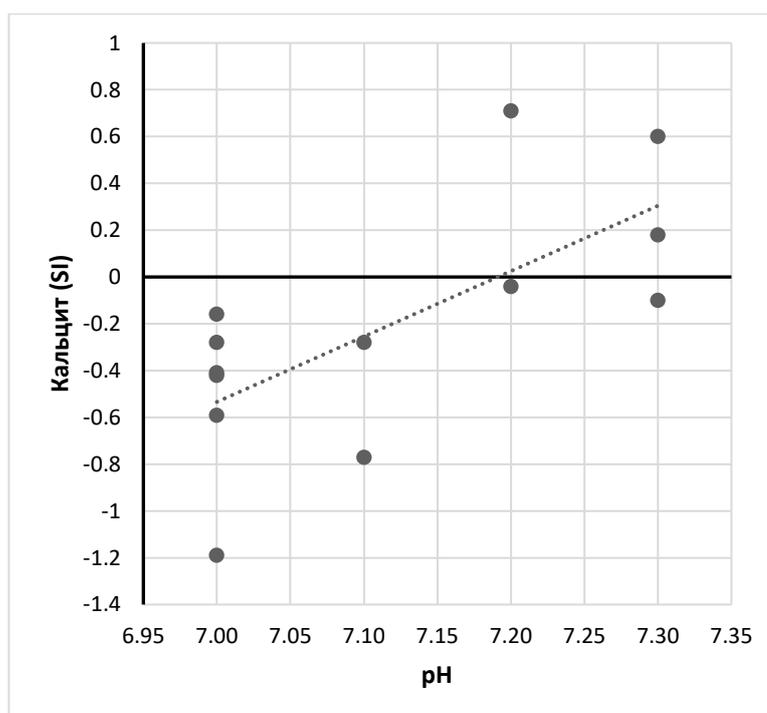


Рис. 4.31. Корреляционная зависимость между величиной pH и индексом насыщения (SI) по отношению к кальциту для скважин, оборудованных на известняки

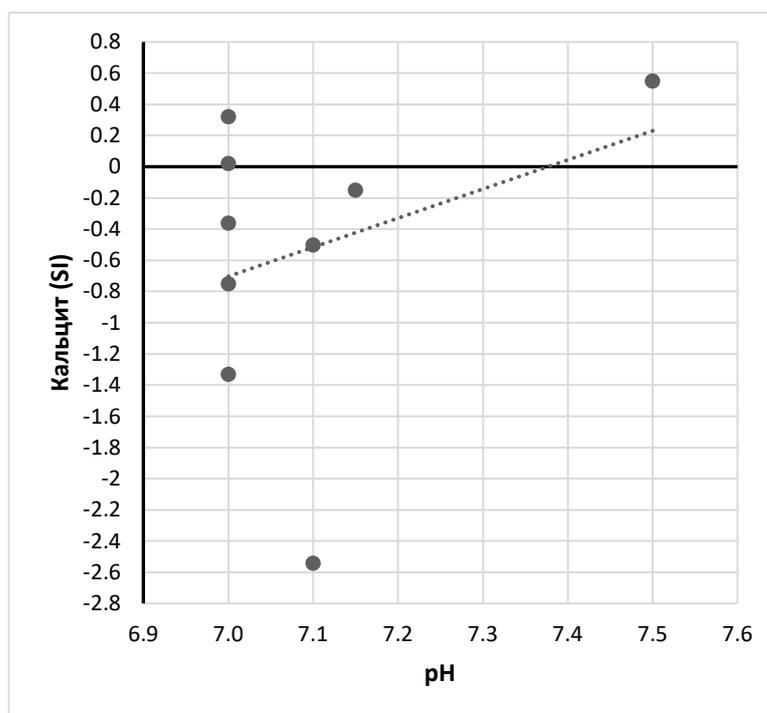


Рис. 4.32. Корреляционная зависимость между величиной **pH** и **индексом насыщения (SI)** по отношению к **кальциту** для скважин, оборудованных на песчаники

На рисунках 4.33-4.34 представлены корреляционные зависимости между минерализацией (TDS, мг/л) и индексом насыщения (SI) по отношению к гипсу для верхнемеловых известняков и нубийских песчаников, соответственно. Для другого сульфатного минерала ангидрита графики аналогичные. Как видно на этих рисунках, и в известняках, и в песчаниках индекс насыщения подземных вод по отношению к сульфатным минералам во всех пробах существенно меньше нуля. И при этом, как и для подземных вод четвертичных отложений, имеется определенная тенденция к увеличению степени насыщенности по мере возрастания минерализации подземных вод, что находится в согласии с отмеченной выше тенденцией к увеличению содержаний сульфатов в водах дочетвертичных отложений при увеличении минерализации (рис. 4.23б и 4.24б).

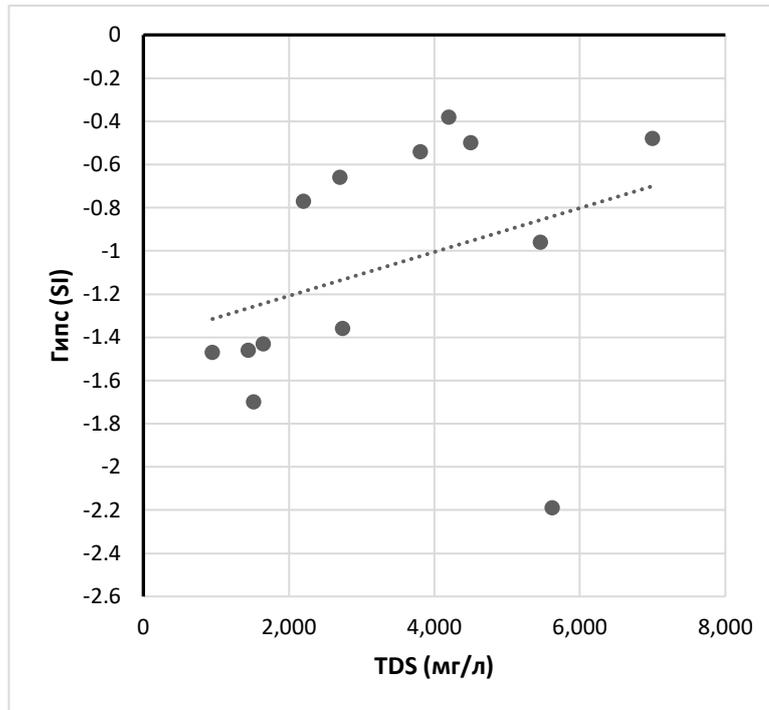


Рис. 4.33. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и **индексом насыщения (SI)** по отношению к **гипсу** для скважин, оборудованных на известняки

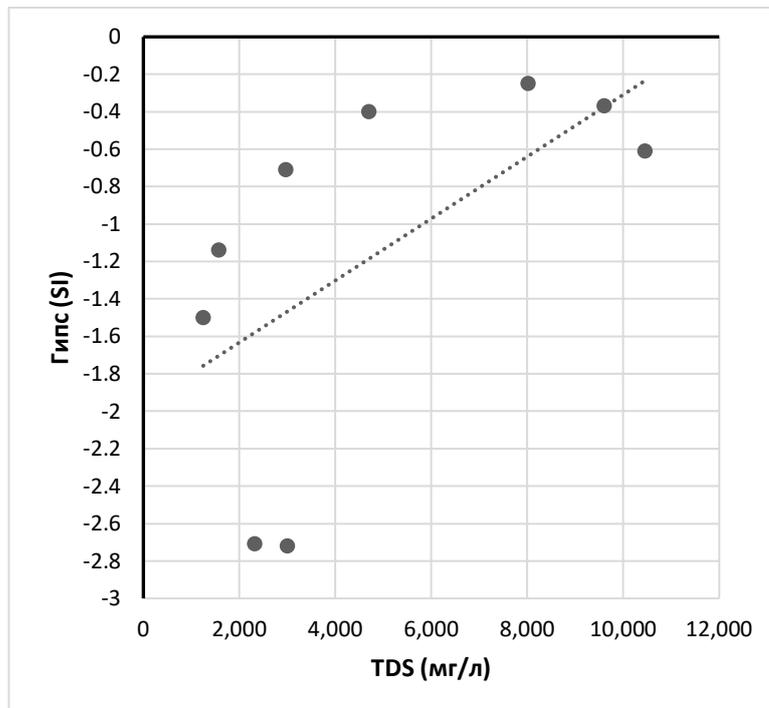


Рис. 4.34. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и **индексом насыщения (SI)** по отношению к **гипсу** для скважин, оборудованных на песчаники

В дочетвертичных отложениях, представленных преимущественно песчаниками и известняками, весьма редко встречаются линзы или

вкрапления сульфатных минералов, растворение которых могло бы привести к росту концентрации сульфатов и, соответственно, к высоким значениям индекса насыщения подземных по отношению к гипсу и ангидриту. Поэтому низкие значения SI по отношению к гипсу и ангидриту является вполне закономерными. При этом следует констатировать, что степень метаморфизации природных вод при упаривании атмосферных осадков далеко не достигает того уровня, когда наступает насыщение воды по отношению к сульфатным минералам. Также следует считать закономерным, что по результатам исследования химического состава подземных вод дочетвертичных отложений степень упаривания атмосферных осадков на Северном Синае часто не достигает даже уровня насыщения по отношению к гораздо менее растворимым карбонатным минералам.

Вероятно, источником повышенных концентраций сульфатов в подземных водах в дочетвертичных отложениях являются воды, либо находившиеся в локальных зонах в непосредственном контакте с гипсом или ангидритом, либо исходно инфильтрогенные, но с относительно высокой степенью упаривания, на что косвенно указывает положительная корреляция концентраций сульфатов и минерализации.

#### **4.3. Районирование территории Северного Синае по минерализации подземных вод**

Минерализация (TDS), как сумма всех растворенных в воде веществ, является обобщенным показателем качества природных вод с точки зрения их использования для питьевого, сельскохозяйственного и культурно-бытового водоснабжения. Потому выявление областей с приемлемыми значениями минерализации подземных вод очень актуально, особенно в засушливых регионах, где подземные воды являются единственным

источником воды, используемым местными жителями, в том числе на Северном Синае.

Существует несколько классификаций (градаций) природных вод по минерализации. Например, в классификации Геологической службы США используются следующие категории:

- Пресная вода: менее 1000 мг/дм<sup>3</sup>
- Соленоватая вода: от 1000 до 10000 мг/дм<sup>3</sup>
- Соленая вода: от 10000 до 35000 мг/дм<sup>3</sup> (минерализация воды мирового океана)
- Гиперсалин: больше 35000 мг/дм<sup>3</sup>

Большинство других классификаций приблизительно совпадают по этим диапазонам. В российской терминологии вместо названия «гиперсалин» обычно используется название «рассол».

По большинству нормативных документов (ВОЗ, ЕС, Россия и др.), применяемым к оценке качества питьевых вод, эти воды должны быть пресными с минерализацией менее 1,000 мг/дм<sup>3</sup>. Следует отметить, что в благоприятных условиях питьевая вода обычно имеет минерализацию ниже 500 мг/дм<sup>3</sup>, однако пресная вода с более высокими значениями TDS также пригодна для питья, но с некоторым ухудшением органолептических свойств.

Выполненное в настоящей работе районирование территории Северного Синае по минерализации произведено по результатам гидрохимического опробования 206 скважин, оборудованных как на четвертичные, так и на дочетвертичные водоносные горизонты [31; 34; 71; 72; 73; 101; и др.].

В соответствии с описанным выше диапазоном изменения минерализации подземных вод на территории Северного Синае при рассматриваемом районировании была принята более дробная (по

сравнению с указанной выше) категоризация, которая представлена в таблице 4.19.

Таблица 4.19- Категоризация минерализации (TDS) подземных вод Северного Синая, принятая при районировании

№	категория	цвет	минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	название
1	A	●	<1000	пресные
2	B	●	1000 – 3000	слабосоленоватые
3	C	●	3000 – 6000	среднесоленоватые
4	D	●	> 6000	сильносоленоватые и соленые

Районирование производилось в точечном формате: цветовая градация по каждой опробованной скважине. Результаты такого районирования представлены на рисунке 4.35.

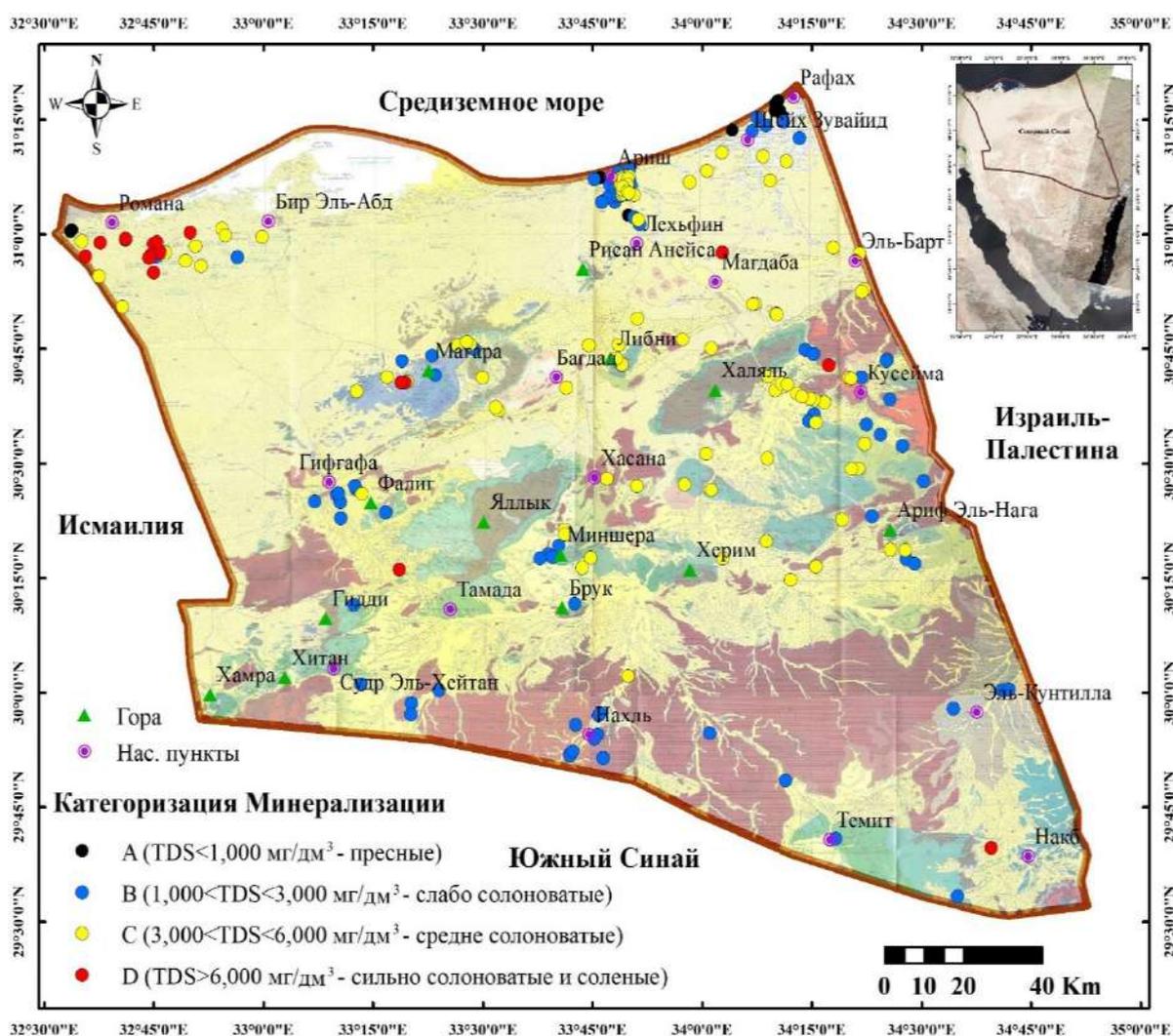


Рис. 4.35. Карта районирования территории северного Синая по минерализации подземных вод

Анализ представленных на рисунке 4.35 результатов районирования подземных вод Северного Синая позволяет сделать следующие выводы:

Пресные воды (категория А), очевидным образом формирующиеся за счет питания инфильтрующимися атмосферными осадками с низкой степенью упаривания, развиты только в четвертичных отложениях и только в районах Эль-Ариш, Рафах и Шейх Зувайид (зоны А и ШР).

Слабосоленоватые воды (категория В) имеются практически во всех горных породах. В дочетвертичных отложениях зоны их развития тяготеют к периферийным участкам территории Северного Синая. Среднесолоноватые воды (категория С) также развиты практически во всех горных породах. В дочетвертичных отложениях зоны их развития тяготеют к центральной части территории северного Синая. Вероятнее всего, формирование этих вод обусловлено также инфильтрацией атмосферных осадков, но с существенно более высокой степенью метаморфизации за счет их упаривания в аридном климате. Очевидно также, что в прибрежных к Средиземному морю районах в четвертичных отложениях такие воды формируются частично и за счет морских интрузий.

Сильно солоноватые и соленые воды (категория D) в четвертичных отложениях выявлены в большом количестве в районе Бир-эль-Абд (зона БРЭА); в восточных районах Эль-Ариш, Рафах и Шейх Зувайид (зоны А и ШР) таких вод в четвертичных отложениях вообще не зафиксировано. Предполагается, что появление подземных вод категории D в районе Бир-эль-Абд обусловлено преимущественно интрузиями морских вод из Средиземного моря. В дочетвертичных отложениях различного возраста подземные воды категории D отмечаются лишь в единичных скважинах. Вероятно, это воды исходно седиментогенные с небольшим разбавлением инфильтрующимися атмосферными осадками. Показательным в данном случае является распределение минерализации подземных вод по глубине.

Если внутри категорий В и С (слабо- и среднесолоноватые воды) какая-либо корреляционная зависимость между минерализацией и глубиной опробования практически отсутствует (рис. 4.36, 4.37), то для категории D (сильно солоноватые и соленые воды) очевидна прямая корреляционная зависимость (рис. 4.38).

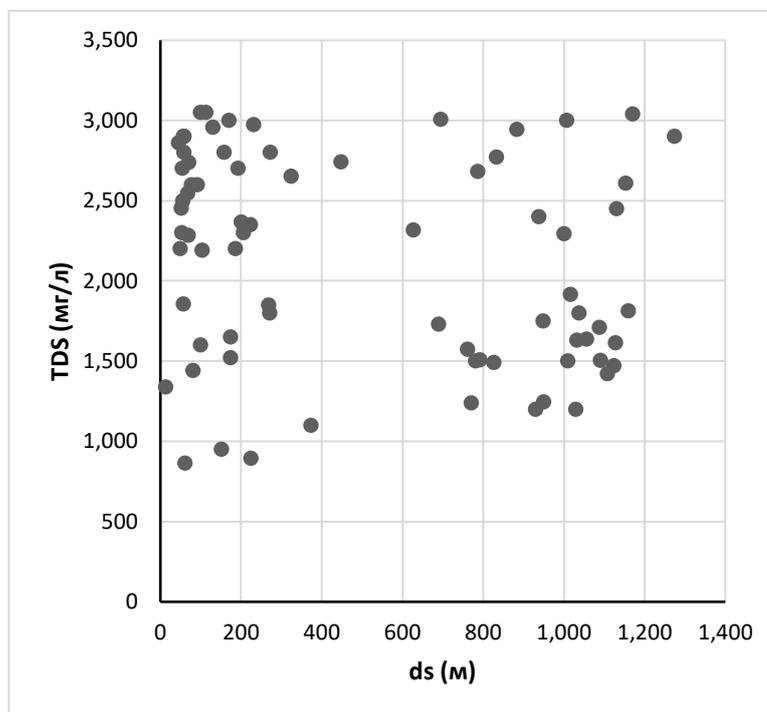


Рис. 4.36. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и **глубиной скважины** (ds, м) для категории минерализации **В** (слабосоленоватые воды)

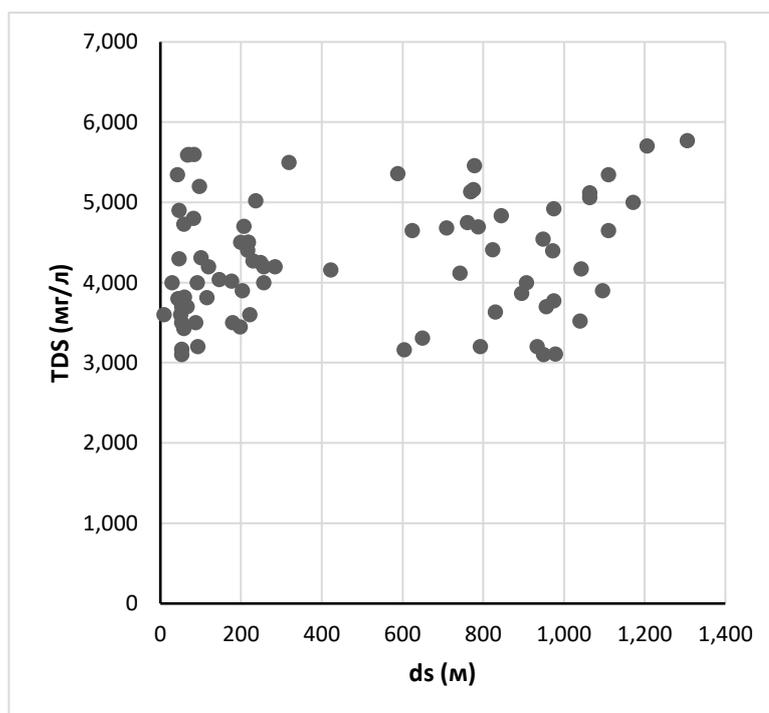


Рис. 4.37. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и **глубиной скважины** (ds, м) для категории минерализации **С** (среднесолоноватые воды)

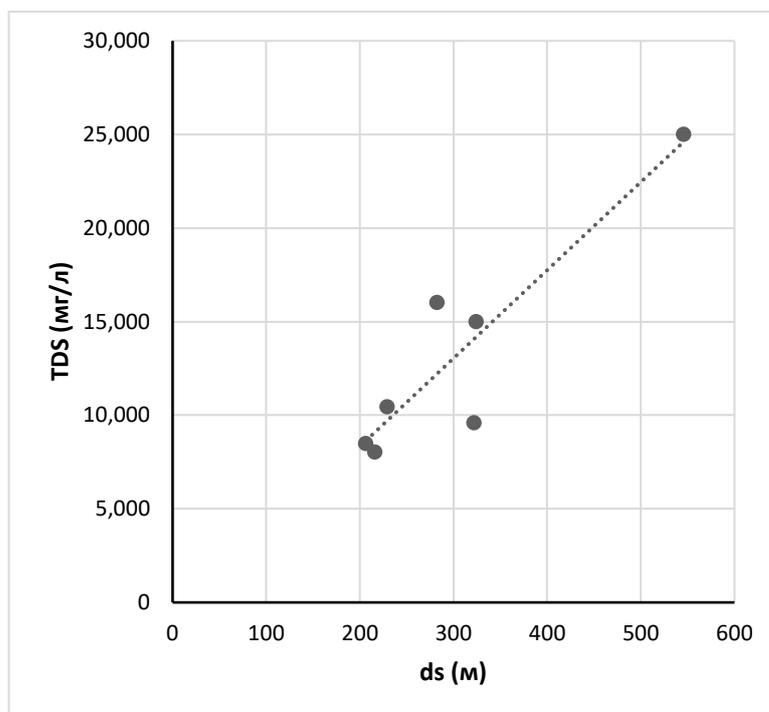


Рис. 4.38. Корреляционная зависимость между **минерализацией** (TDS, мг/дм<sup>3</sup>) и **глубиной скважины** (ds, м) для категории минерализации **Д** (сильносолоноватые и соленые воды)

## ГЛАВА 5. СТРУКТУРА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА СЕВЕРНОМ СИНАЕ

Представленная ниже характеристика структуры фильтрационных потоков подземных вод для Северного Синая составлена по совокупности результатов всех проведенных ранее на данной территории исследований, связанных с построениями карт гидро- и пьезоизогипс и выявлением основных направлений фильтрационных потоков на различных локальных площадях, в том числе в последние годы [10; 11; 18; 19; 22; 35; 44; 57; 58; 65; 69; 75; 78; 79; 82; 84; 92; 93; 94; 102; 106; и др.].

Как было сказано выше, основой фактологической базой исследований являлась информация по гидрогеологическим скважинам, содержащаяся в обобщающем отчете “North Sinai Groundwater Resources Study in the Arab Republic of Egypt” [60], а также дополнительно предоставленная Институтом водных исследований (WRRI) при Министерстве ирригации и водных ресурсов Арабской Республики Египет [7]. В рамках настоящей главы 4 проведено обновление информации по уровням подземных вод во всех существующих гидрогеологических скважинах в районе Северного Синая. Результатом этой систематизации стала соответствующая база данных, в которую в совокупности включены материалы по 250 скважинам [31; 34; 71; 72; 73; 101; и др.].

Как и в предыдущих главах, уровенный режим подземных вод представлен по отдельности: для четвертичного, верхнемелового-палеогенового и нижнемелового водоносных горизонтов. В соответствии с этим делением были составлены карты гидроизогипс (карты распределения уровня подземных вод в гидрогеологических скважинах) в пределах Северного Синая. Основной целью построения этих карт является прослеживание основных направлений естественной фильтрации подземных вод – линий тока, перпендикулярных эквипотенциальным

линиям гидроизогипс (линиям равных напоров подземных вод). Кроме того, в отдельных точках показано влияние интенсивной откачки подземных вод на современное изменение структуры естественного потока подземных вод в основных водоносных горизонтах.

### **5.1. Водоносные горизонты четвертичных отложений**

Как уже было указано в предыдущих главах, распространение водоносных горизонтов значимой мощности в четвертичных отложениях ограничено только прибрежной равниной вдоль Средиземного моря – водонасыщенные относительно мощные четвертичные отложения протягиваются вдоль прибрежной равнины полосой шириной 10 - 15 км от устьевой части вади Эль-Ариш до района Рафаха (рис. 3.1).

В целом для водоносных горизонтов четвертичных отложений для построения карт гидроизогипс в распоряжении автора имелись данные по положению статического уровня подземных вод (SWL) в 45 скважинах, из них в 33 скважинах в районе вади Эль-Ариш (зона\_А) и в 12 скважинах в районах Рафах и Шейх Зувайида (зона\_ШР).

С помощью программы SPSS были выполнены статистические оценки для распределения значений отметок измеренных уровней воды в гидрогеологических скважинах (SWL). Для четвертичных отложений были рассмотрены различные выборки данных в зависимости от районов опробования: 1) генеральная совокупность для всех четвертичных отложений («Четв. в целом»); 2) в долине вади Эль-Ариш («зона\_А») и 3) в районах Шейх Зувайид и Рафах (зона\_ШР). Результаты расчета статистических параметров приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1- Статистические параметры распределения отметок измеренных уровней воды в гидрогеологических скважинах (SWL) в четвертичных отложениях для разных зон, м абс.

Показатель	Четв. в целом	Зона_А	Зона_ШР
N	45	33	12
среднее	1,05	0,30	3,10
медиана	1,20	0,90	2,60
станд. откл.	2,50	2,10	2,20
минимум	-8,40	-8,40	0,90
максимум	8,10	3,10	8,10

Как видно из таблицы 5.1, статические уровни подземных вод в четвертичных отложениях в пределах прибрежной долины колеблются в весьма узком диапазоне от +8,10 до –8,40 м абс. (в зоне\_А от +3,10 до –8,40 м абс.; в зоне\_ШР от +8,10 до +0,90 м абс.), причем отрицательные значения однозначно связаны с эксплуатационными откачивающими подземные воды скважинами.

Очевидно, что в районе вадии Эль-Ариш помимо основного направления потока подземных вод в сторону генеральной дрены – Средиземного моря, наблюдаются также локальные изменения данного потока, обусловленные двумя факторами: 1) дренажное влияние самой вадии, по крайней мере, в течение большей засушливой части года и 2) дренажным эффектом от эксплуатационных водозаборных скважин (рис. 5.1). Максимальные отметки уровня воды закономерно наблюдаются на юге прибрежной долины, то есть в области питания четвертичных водоносных горизонтов со стороны дочетвертичных отложений, и также закономерно снижаются в сторону к оси вадии, уменьшаясь в целом до 0 м абс. по урезу воды Средиземного моря. И исключениями из этого правила оказываются только точки расположения водозаборных скважин, где отметки уровней подземных вод опускаются ниже 0 м абс.

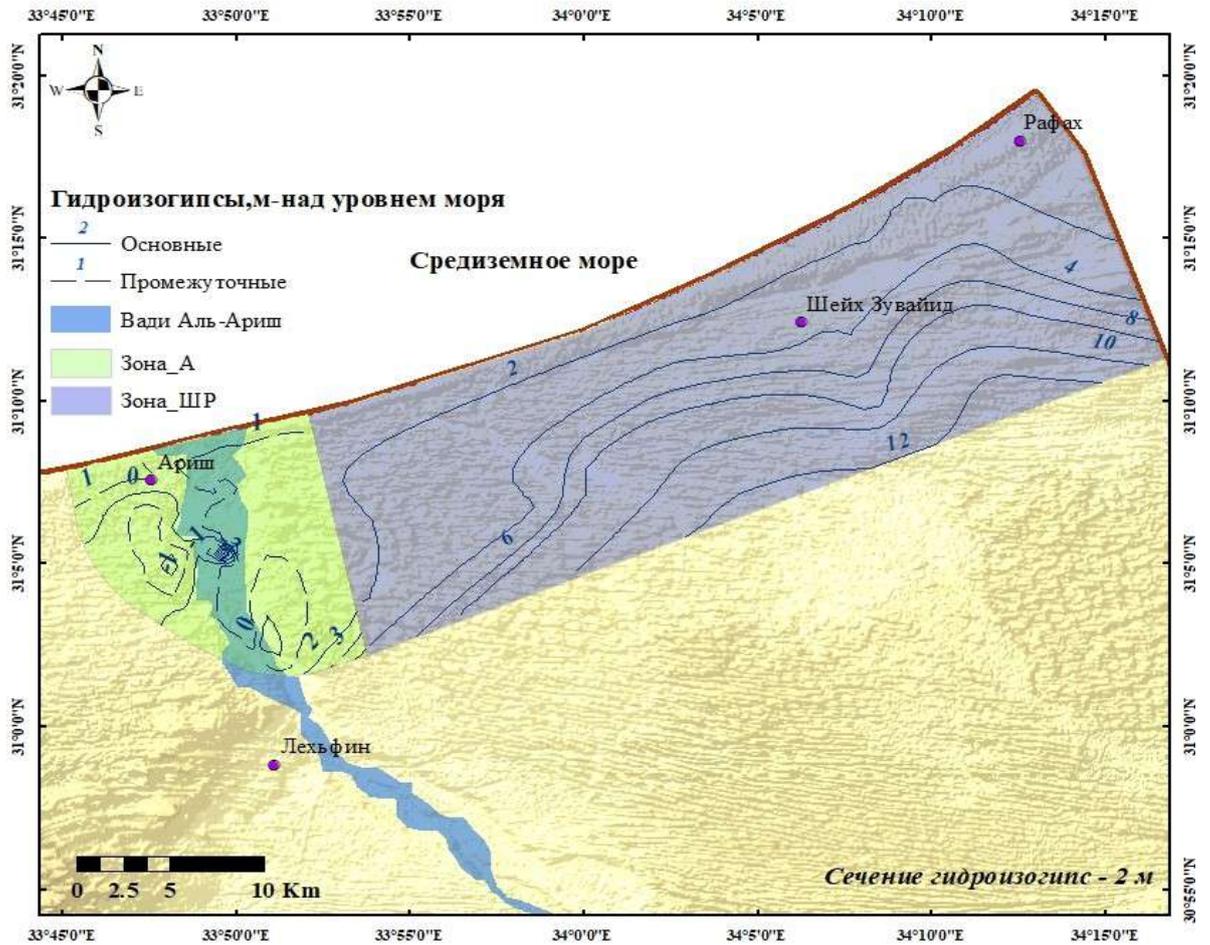


Рис. 5.1. Карта гидроизогипс в зоне А и зоне III

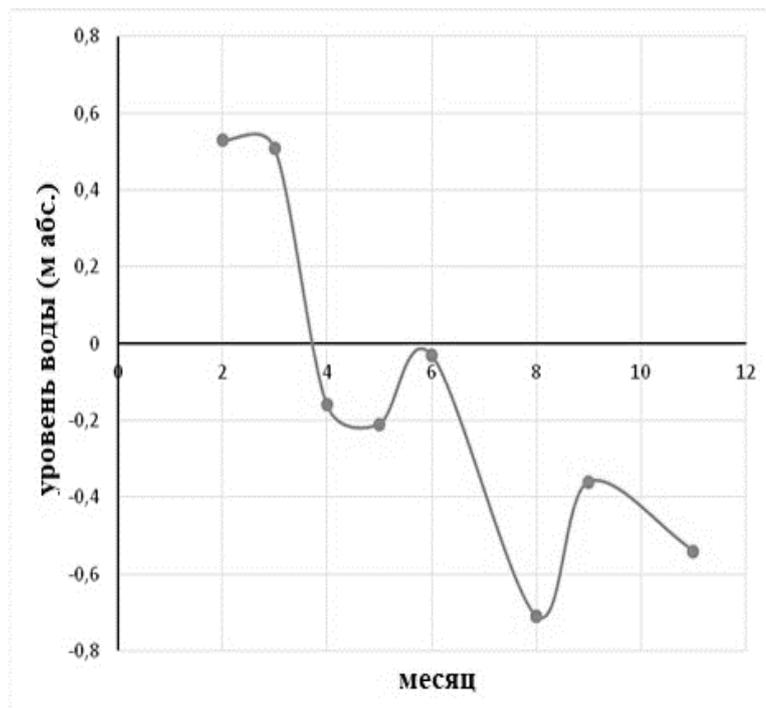


Рис. 5.2. Изменение уровня воды в водозаборной скважине № А79, расположенной в зоне А

На рисунке 5.2 представлен типовой график изменения уровня воды в водозаборных скважинах – на примере скважины № А79 в 2016 году: в январе-феврале (в период максимального паводка) уровень воды составлял +0,53 м абс., а к августу, к максимуму засушливого периода, снизился до - 0,71 м абс. Очевидным образом, существует настоятельная необходимость разработки плана надлежащего управления ресурсами подземных вод в районе Эль-Ариш в течение различных сезонов года.

В районах Рафах и Шейх Зувайид (зона\_ШР) направление потока подземных вод определяется в основном, как и в зоне\_А, их движением от южной границы развития четвертичных водоносных горизонтов на север, к урезу Средиземного моря (рис. 5.1). Дренажный эффект со стороны мелких вадии имеет здесь подчиненное значение. И ещё меньшее значение имеют отдельные водозаборные скважины с малыми дебитами откачки.

Не исключено, что снижение уровня воды в водозаборных скважинах может повлиять на качество откачиваемых подземных вод. Для оценки этого эффекта для обеих зон – А и ШР – были построены корреляционные зависимости минерализации подземных вод (TDS) от значения отметки уровня воды в скважинах (SWL) (рис. 5.3 и 5.4).



наоборот, наблюдается некоторая тенденция к росту минерализации при увеличении отметок уровня воды в скважинах при значениях последних больше 0 м абс. Данные закономерности требуют дальнейшего изучения по мере накопления соответствующего фактического материала.

## **5.2. Водоносные горизонты дочетвертичных отложений**

Морфологически территория Синайского полуострова, представленная преимущественно дочетвертичными отложениями, состоит из двух основных зон – Центральное плато и складчатые горы зоны Сирийской дуги. Южная часть Синай состоит из сложного комплекса складчатых гор, образованных докембрийскими магматическими и метаморфическими породами; этот район характеризуется наивысшими на Синае абсолютными отметками. Поэтому основное направление потока подземных и поверхностных вод, совпадающее с направлениями течения поверхностных вод по различным вади, - с юга на север Синай, так же, как и в водоносных горизонтах четвертичных отложений, – к Средиземному морю.

Южная часть полуострова представляет собой массивное плато, на восточном и западном флангах которого основной поток подземных вод направлен соответственно к двум другим, кроме Средиземного моря, генеральным дренам: заливам Акаба и Суэцкому, что обусловлено близостью урезов воды в этих заливах к нулевым абсолютным отметкам. Кроме того, локальные флуктуации потока подземных вод обусловлены здесь наличием дренажной системы различных вади, основной из которых является вади Эль-Ариш с притоками. При этом район, в котором на северном Синае развиты дочетвертичные водоносные горизонты, представлен большими горными блоками, которые относятся к зоне Сирийской дуги (Гебель Магара, Халяль и Еллек), расположенными вдоль

генеральной оси, направленной с юго-запада на северо-восток. Большинство этих гор в основном состоят из известняка, мергеля и песчаника, возраст которых варьирует от юры до верхнего мела. Данные отложения и выступают в качестве водовмещающих для водоносных горизонтов в этих районах.

В целом для построения карт гидроизогипс водоносных горизонтов дочетвертичных отложений в распоряжении автора имелись данные по положению статического уровня подземных вод (SWL) в 106 скважинах, из них в 46 скважинах, оборудованных на водоносные горизонты в верхнемеловых-палеогеновых известняках, и в 60 скважинах, оборудованных на водоносные горизонты в нижнемеловых нубийских песчаниках.

С помощью программы SPSS были выполнены статистические оценки для распределения значений отметок измеренных уровней воды в гидрогеологических скважинах (SWL). Для дочетвертичных отложений были рассмотрены различные выборки данных, аналогичные расчетам при анализе гидрогеохимической информации – в зависимости от возраста и литологии опробованных водоносных горизонтов: 1) генеральная совокупность для всех дочетвертичных отложений («Дочетв. в целом»); 2) водоносные горизонты в известняках и 3) водоносные горизонты в песчаниках. Результаты расчета статистических параметров приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2- Статистические параметры распределения отметок измеренных уровней воды в скважинах (SWL) для дочетвертичных водоносных горизонтов, м абс.

Показатель	Дочетв. в целом	Известняки K <sub>2</sub> +Pg	Песчаники K <sub>1</sub>
N	106	46	60
Среднее	182	123	227
Медиана	180	120	224
Станд. откл.	95	69,5	87,5
Минимум	3,1	3,1	23,6
Максимум	420	300	420

Как видно из этой таблицы, статические уровни подземных вод в дочетвертичных отложениях, в отличие от уровней в четвертичных отложениях в пределах прибрежной долины, колеблются в весьма широком диапазоне от +400 до +3,1 м абс. (в выборке известняк от +300 до +3,1 м абс.; в выборке песчаник от +420 до +24 м абс.) И, таким образом, даже на основе только этих данных можно констатировать, что градиенты напоров подземных вод (гидравлические уклоны) в дочетвертичных водоносных горизонтах существенно выше, чем в четвертичных водоносных горизонтах, развитых в прибрежной долине вдоль уреза Средиземного моря.

На рисунках 5.5 и 5.6 показаны карты гидроизогипс в водоносных горизонтах, развитых в верхнемеловых-палеогеновых известняках и нижнемеловых песчаниках, соответственно.

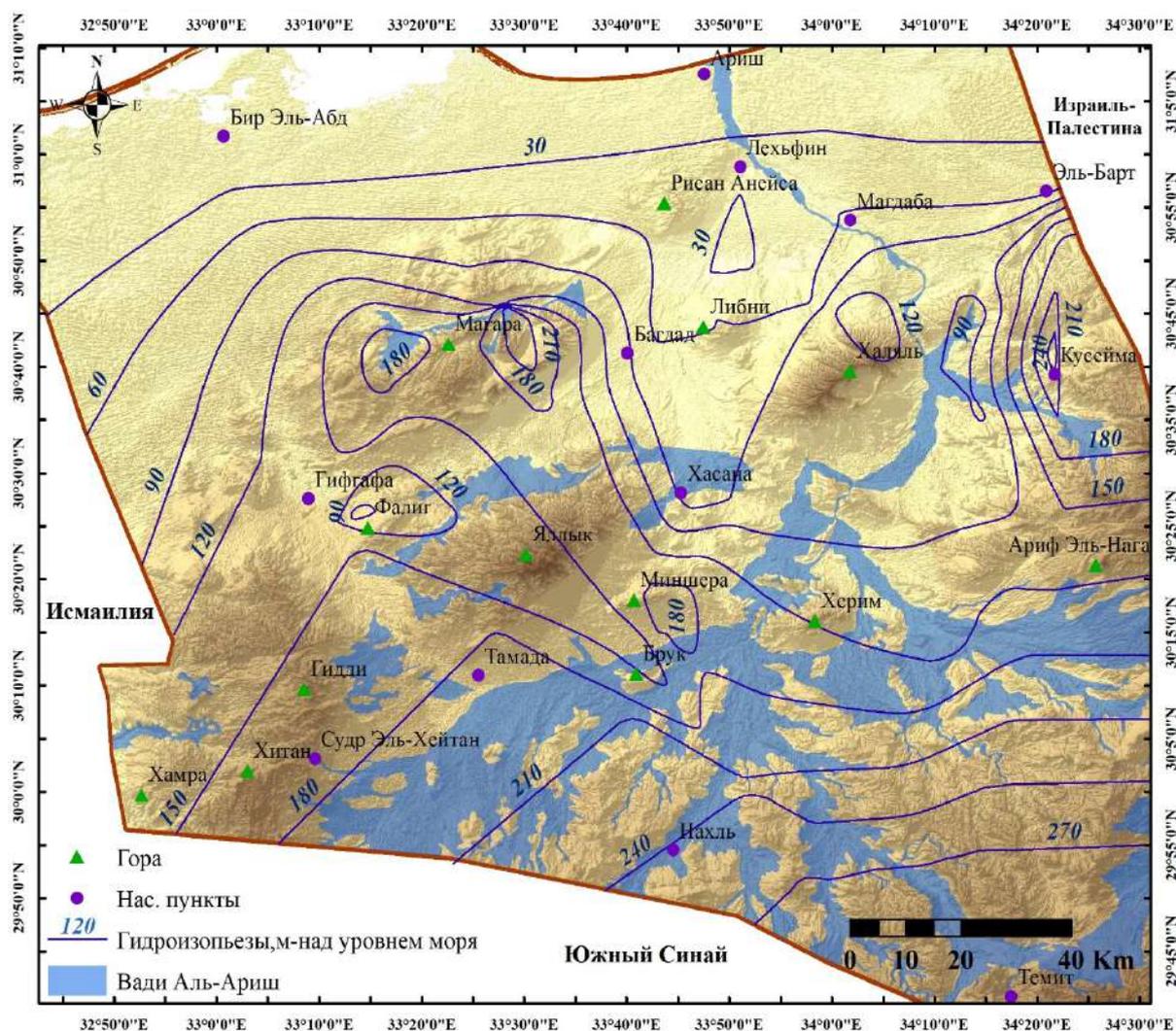


Рис. 5.5. Карта гидроизогипс водоносного горизонта верхнемеловых-палеогеновых известняков

Как видно на рисунке 5.5, в водоносном горизонте верхнемеловых-палеогеновых известняков на фоне общей описанной выше тенденции развития потока подземных вод в отдельных районах, например, вокруг населенных пунктов Гебель Фалига, Гебель Халяль, Хасана и Рисан Анейса, уровень подземных вод оказывается существенно ниже, чем в соседних районах, что, очевидно, связано с интенсивной откачкой подземных вод из водозаборных скважин, поскольку здесь подземные воды являются единственным источником водоснабжения. И, наоборот, в районах населенных пунктов Гебель-Магара и Кусейма уровень воды увеличивается до 200 м над уровнем моря, что однозначно следует считать повышенным по сравнению с уровнями в соседних районах. Это, по-видимому, связано с

расположением этих участков на относительно повышенных территориях, в пределах блоков известняков, гидравлически изолированных от окружающих зон.

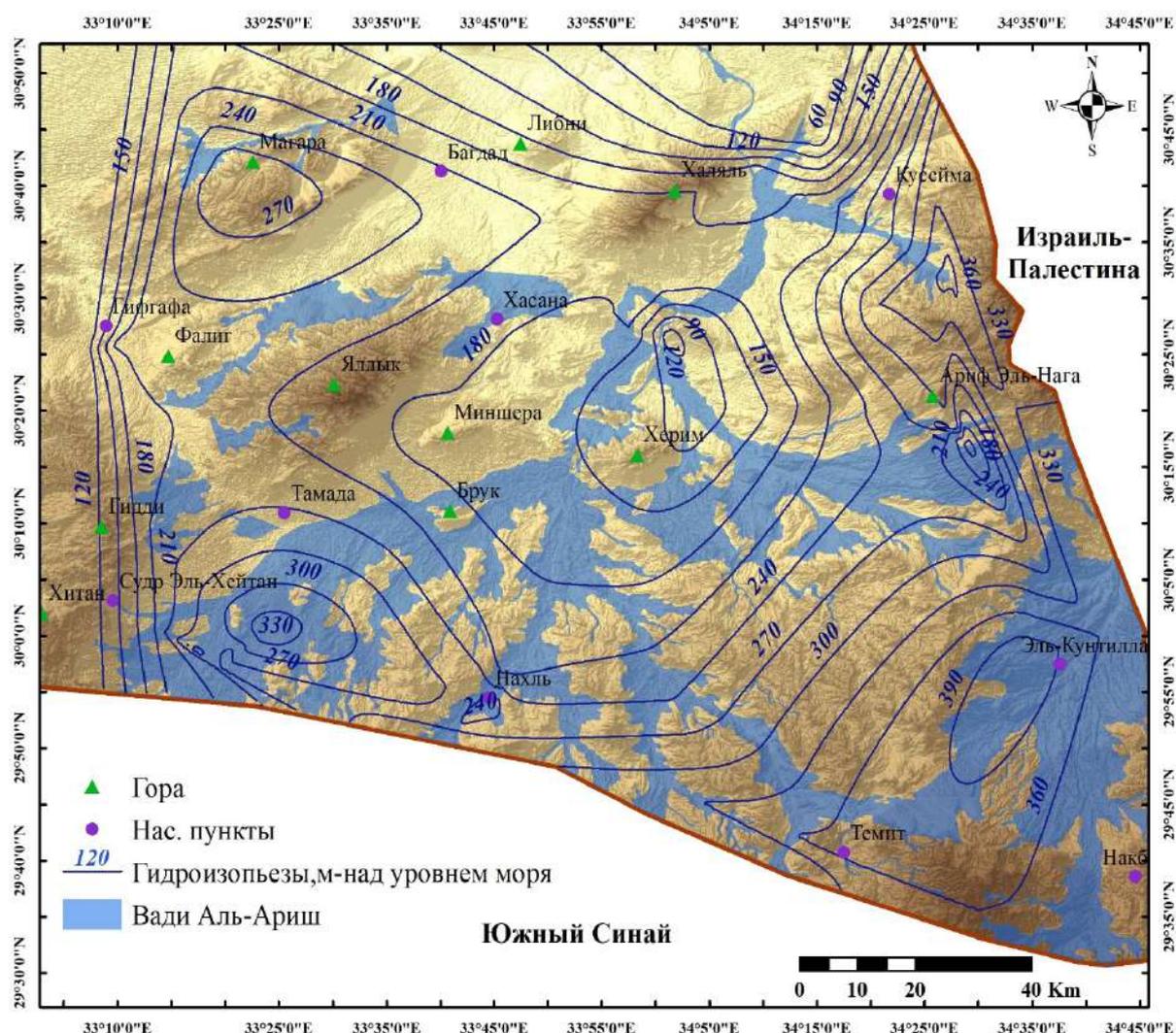
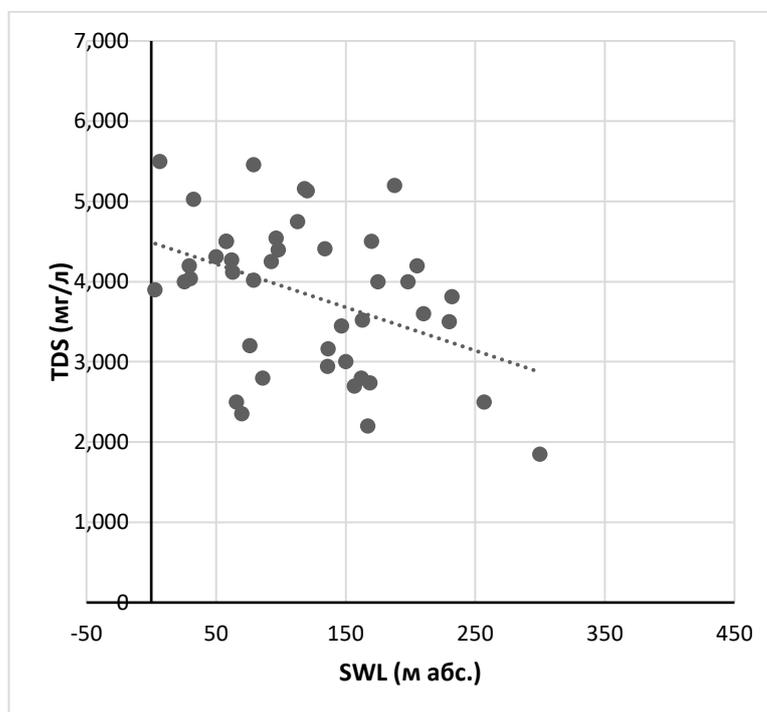


Рис. 5.6. Карта гидроизогиПС водоносного горизонта нижнемеловых (нубийских) песчаников

Как видно на рисунке 5.6, в соответствии с указанным выше направлением генерального потока с юга на север, наибольшие уровни подземных вод в песчаниках +410 и +330 м абс., наблюдаются в районе Эль-Кунтилла на юго-востоке и в районе Судр-эль-Хейтан на юго-западе Северного Синая; а самые низкие уровни – порядка +50 абс. – к северо-востоку от Гебель Халяля. И, таким образом, пьезометрическая поверхность водоносного горизонта нубийских песчаников опускается ориентировочно с юга на север со средним гидравлическим уклоном порядка 0,003. При

этом, как и в случае с известняками, в отдельных районах, например, вокруг населенного пункта Гебель-Херим, уровень подземных вод в песчаниках оказывается заметно ниже, чем в соседних районах, что обусловлено интенсивной откачкой подземных вод из водозаборных скважин.



качества откачиваемых вод, по крайней мере, в сторону увеличения минерализации.

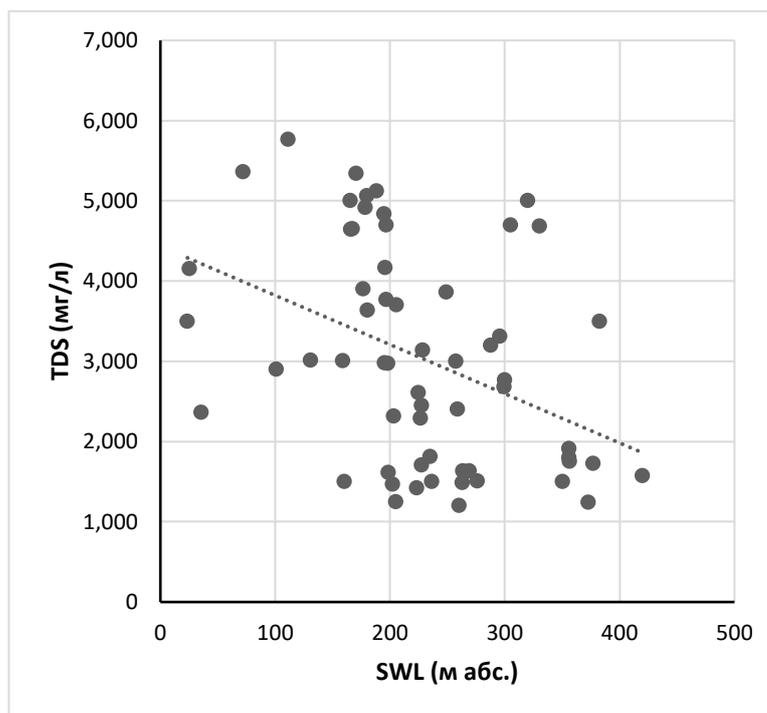


Рис. 5.8. Корреляционная зависимость между минерализацией (TDS) и уровнем подземных вод в скважинах (SWL), оборудованных на нижнемеловые песчаники

### 5.3. Обобщенная структура фильтрационного потока подземных вод в пределах Северного Синая

На рисунке 5.9 представлена обобщенная структура фильтрационного потока подземных вод в пределах северного Синая, составленная по совокупности всех измерений уровней подземных вод в различных водоносных горизонтах, залегающих первыми от поверхности [1; 3; 5].

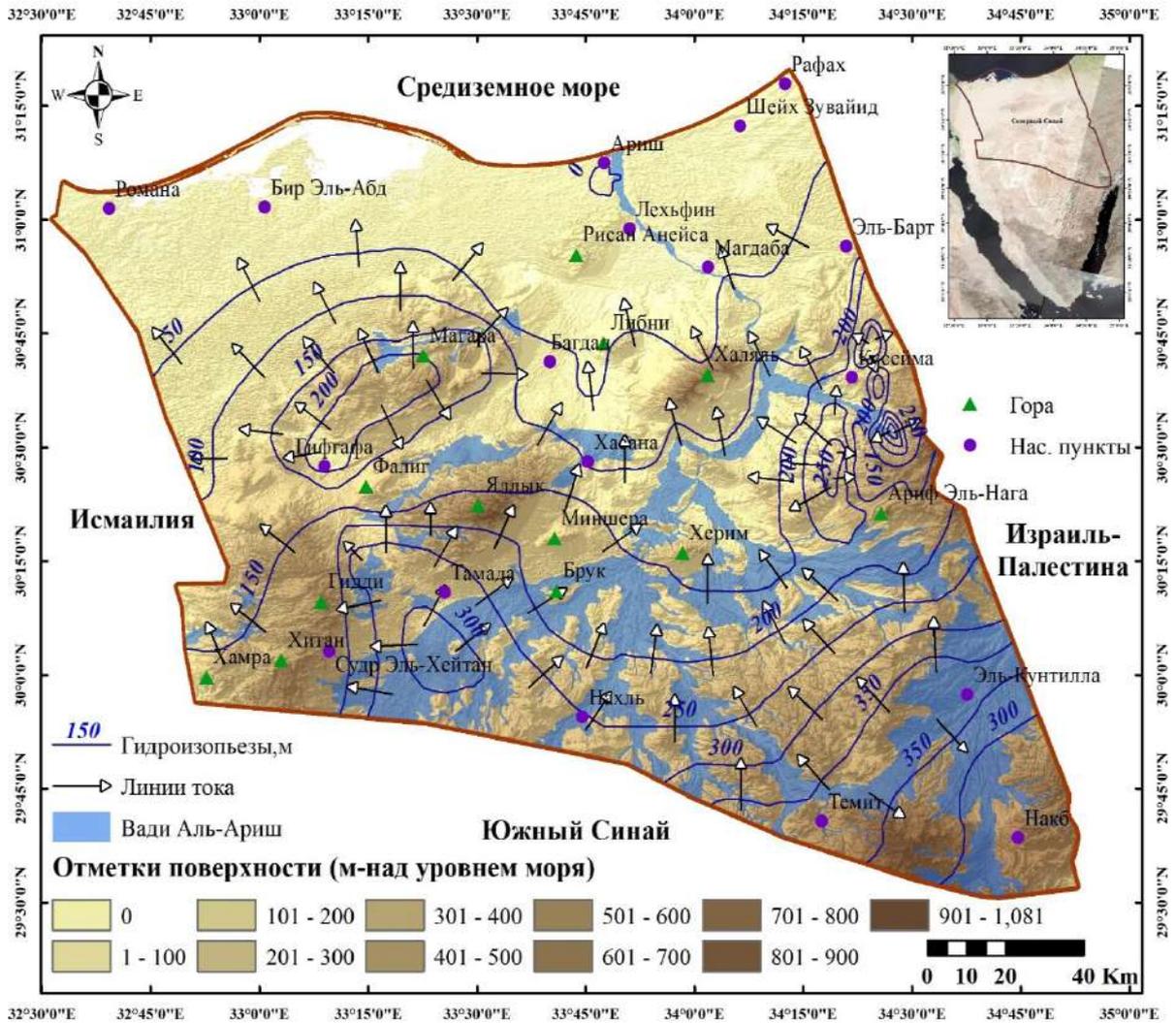


Рис. 5.9. Обобщенная структура фильтрационного потока подземных вод в пределах Северного Синая

Как и было показано выше, для отдельных водоносных горизонтов (рис. 5.1, 5.5 и 5.6) обобщенный поток подземных вод, очевидно, перетекающих в субгоризонтальном направлении из одних горизонтов в другие, направлен в основном с юга на север Северного Синая, в сторону генеральной дрены - Средиземного моря, а также частично в западном и восточном направлениях, в сторону заливов Акаба и Суэцкому (в том числе и к Суэцкому каналу). В среднем гидравлический уклон основного фильтрационного потока подземных вод с юга на север составляет порядка 0,002.

Закономерно на этой карте проявляется тот факт, что внутренние, более локальные потоки подземных вод определяются наличием повышенных и пониженных участков рельефа и, как следствие, пониженными отметками уровней подземных вод. То есть обобщенный поток подземных вод направлен от областей их питания, таких как районы Нахль, Темед и Судр-эль-Хейтан, к областям их разгрузки, к Средиземному морю, Суэцкому заливу и заливу Акаба, а также (в локальном смысле) к долинам основных вади.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате описанных в главах 1, 2, 3 и 4 исследований были достигнуты исходно поставленные цели гидрогеологического изучения северного Синая:

- оценены фильтрационные свойства различных водоносных горизонтов;
- выяснена структура фильтрационных потоков подземных вод в различных горизонтах;
- дана характеристика химического состава подземных вод различных водоносных горизонтов.

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

Распространение водоносных горизонтов в четвертичных отложениях значимой мощности (до 100 м) ограничено прибрежной равниной вдоль Средиземного моря шириной 10 до 15 км. Основными водовмещающими породами в толще четвертичных отложений являются песок, гравий и отложения «куркар» (известковый песок).

Все четвертичные отложения характеризуются весьма высокими значениями коэффициентов фильтрации, составляющими в среднем десятки и даже сотни м/сут. Отложения куркара и гравия характеризуются весьма большим разбросом величин коэффициента фильтрации – в десятки раз. Вероятнее всего, это обусловлено различной степенью цементации данных пород. Отложения песков более однородны с фильтрационной точки зрения: минимальные коэффициенты фильтрации отличаются от максимальных всего в 2,5–3,5 раза.

Однозначного тренда на графиках корреляционных зависимостей между коэффициентом фильтрации ( $K$ ) и глубиной опробованной скважины ( $d_s$ ) ни по всем четвертичным отложениям в целом, ни по каждой из указанных разновидностей пород не наблюдается.

В работе представлено площадное (в плане) районирование территории развития четвертичных отложений по значениям коэффициентов фильтрации в пределах прибрежной равнины. С точки зрения водообильности развитие водоснабжения за счет горизонтов, сложенных отложениями куркара и гравием, представляется наиболее перспективным в районе вади Эль-Ариш, а для горизонта, сложенного песками, - в районах северо-западной части Северного Синая.

Статические уровни подземных вод в четвертичных отложениях колеблются в весьма узком диапазоне от +8,10 до -8,40 м абс. Причем отрицательные значения однозначно связаны с эксплуатационными откачивающими подземные воды скважинами.

Главной проблемой использования всех подземных вод в Северном Синае для водоснабжения является их относительно высокая соленость.

В водоносных горизонтах в четвертичных отложениях в целом минерализация подземных вод в подавляющем большинстве случаев колеблется в диапазоне от 1900 до 5100 мг/дм<sup>3</sup>. Однозначных корреляционных зависимостей между минерализацией подземных вод (TDS) и глубиной опробованной скважины (ds) не наблюдается. Пресные воды с минерализацией менее 1000 мг/дм<sup>3</sup> встречаются в отдельных скважинах, оборудованных на самые верхние горизонты песков (в основном на отложения прибрежных песчаных дюн) и гравийных отложений, что указывает на пополнение запасов пресной воды в этих слоях за счет современного инфильтрационного питания атмосферными осадками.

Принципиальных различий в статистических параметрах распределения различных показателей химического состава подземных вод для всех указанных отложений не выявлено. Все солоноватые воды являются околонеутральными или слабощелочными в среднем сульфатно-хлоридными преимущественно кальциево-магниевыми-натриевыми.

Естественным образом однозначно проявляется прямая линейная зависимость минерализации (TDS) от концентраций Cl и Na и менее однозначно – от содержания SO<sub>4</sub>. Для остальных макрокомпонентов существенной зависимости не отмечается.

На большей части прибрежной равнины рассчитанный с использованием программы PHREEQC индекс насыщения подземных вод (SI) по отношению к породообразующим карбонатным минералам в четвертичных отложениях существенно меньше нуля. При этом практически отсутствует зависимость насыщенности от минерализации. Таким образом, при формировании химического состава вод преобладающее влияние оказывают инфильтрационное питание атмосферными осадками и/или интрузии морской воды из Средиземного моря. При этом даже относительно высокая в среднем величина испарения в аридном климате не приводит к насыщению подземных вод по отношению к карбонатным минералам. Исключение составляют подземные воды в пределах вади Эль-Ариш, которые, наоборот, в подавляющем большинстве случаев являются насыщенными или даже пересыщенными по отношению ко всем карбонатным минералам (SI близок или более 1). Зависимость насыщенности от минерализации здесь также отсутствует. Очевидно, что формирование этих вод определяется, в первую очередь, не инфильтрацией атмосферных осадков в паводковые периоды и не интрузиями морских вод, а инверсионным питанием горизонтов непосредственно из вади Эль-Ариш в периоды половодий, когда отметка уреза воды во временном водотоке значительно превышает отметки уровней подземных вод в прилегающих областях.

Индекс SI для всех подземных вод в четвертичных отложениях по отношению к сульфатным минералам существенно меньше нуля. Но при этом, в отличие от ситуации с карбонатными минералами, имеется

определенная тенденция к увеличению степени насыщенности по мере возрастания минерализации подземных вод. Вероятно, факторами повышения концентраций сульфатов здесь являются либо упаривание инфильтрующихся атмосферных осадков, либо воды, развитые в дочетвертичных породах, которые поступают в четвертичные отложения за счет субвертикального перетока снизу вверх или при описанном выше процессе оттока воды из вади Эль-Ариш.

Дочетвертичные осадочные породы развиты на Северном Синае повсеместно. Среди них выделяются породы юрского, нижнемелового, верхнемелового и палеогенового возраста. Анализ распределения значений коэффициентов фильтрации по выборкам, соответствующим возрасту водовмещающих пород, оказался малоинформативным: характерны чрезвычайно большой разброс значений и отсутствие какой-либо корреляционной связи с условиями залегания опробуемых интервалов.

Дочетвертичные водовмещающие отложения представлены в основном двумя разновидностями пород: верхнемеловыми-палеогеновыми известняками и нижнемеловыми нубийскими песчаниками. Средние и медианные значения коэффициентов фильтрации в известняках и песчаниках являются величинами одного порядка, но в разы и даже в десятки раз меньше, чем в четвертичных водоносных горизонтах. Внутри каждой из указанных выборок отмечается весьма большой разброс: в известняках - от 0,10 до 113 м/сут, в песчаниках - от 0,13 до 87 м/сут. Очевидно, что проницаемость всех дочетвертичных отложений определяется не фильтрационными свойствами в пористых блоках, а интенсивностью трещиноватости водовмещающих пород. При этом наибольшие значения коэффициентов фильтрации (более 60 м/сут) как в известняках, так и в песчаниках отмечаются только до глубины менее 400 м, а на глубинах более 400 м эти значения вообще не превышают 20 м/сут,

составляя в подавляющем большинстве случаев порядка 5 м/сут в известняках и 10 м/сут в песчаниках.

Как и для четвертичных отложений, в работе представлено площадное (в плане) районирование территории развития дочетвертичных отложений по значениям коэффициентов фильтрации, но уже для всей территории Северного Синая. С точки зрения водообильности наиболее перспективными для добычи подземных вод являются следующие районы: в окрестностях Эль-Кусаима, Багдада, Гебель Либни, и Гебель Эль-Магара для водоносного горизонта верхнемеловых-палеогеновых известняков и вокруг Эль-Кусаима и Гебель Ариф Эль-Нага, а также в Рафахе и Шейх Зувайиде для водоносного горизонта нубийских песчаников.

Статические уровни подземных вод в дочетвертичных отложениях на севере Синая в целом, в отличие от уровней в четвертичных отложениях в пределах прибрежной равнины, колеблются в весьма широком диапазоне от +400 до +3,1 м абс., что, естественно, обусловлено рельефом рассматриваемой территории.

В водоносных горизонтах дочетвертичных отложений в целом минерализация подземных вод в подавляющем большинстве случаев колеблется приблизительно в том же диапазоне, что и в четвертичных отложениях: от 950 до 7000 мг/дм<sup>3</sup>, при этом однозначных корреляционных зависимостей между минерализацией подземных вод (TDS) и глубиной опробованной скважины (ds) не наблюдается.

Принципиальных различий в статистических параметрах распределения различных показателей химического состава подземных вод также не наблюдается. И в известняках, и в песчаниках развиты как практически пресные (около 1000 мг/дм<sup>3</sup>), так и солоноватые, околонейтральные или слабощелочные подземные воды, в среднем сульфатно-хлоридные и преимущественно натриевые. То есть по

химическому составу подземные воды в дочетвертичных отложениях мало чем отличаются от подземных вод, развитых в четвертичных отложениях.

Индекс насыщения подземных вод (SI) в обоих водоносных горизонтах дочетвертичных отложений по отношению к породообразующим карбонатным минералам колеблется в чрезвычайно широком диапазоне: от  $-2,5 \div -1,5$  до  $+0,5 \div +0,8$ , то есть подземные воды дочетвертичных отложений могут быть как недосыщенными, так и пересыщенными по отношению к карбонатным минералам (вне зависимости от минерального состава водовмещающих горных пород). Сколь угодно очевидной зависимости между индексом насыщения по отношению к карбонатным минералам и глубиной отбора проб не наблюдается ни в песчаниках, ни в известняках, что, очевидно, свидетельствует о наличии различных условий формирования подземных вод на различных опробованных участках.

И в верхнемеловых-палеогеновых известняках, и в нижнемеловых песчаниках индекс насыщения подземных вод по отношению к сульфатным минералам, как и в четвертичных водоносных горизонтах, существенно меньше нуля. И при этом также имеется определенная тенденция к увеличению степени насыщенности по мере возрастания минерализации подземных вод.

Вероятнее всего, современный химический состав подземных вод в дочетвертичных отложениях обусловлен смешением в различных пропорциях исходных соленых седиментогенных вод и инфильтрационных вод с учетом их упаривания в аридном климате, а также перетоками из одних водоносных горизонтов в другие и процессами ионного (катионного) обмена. Источником повышенных концентраций сульфатов, вероятно, являются воды, либо находившиеся в локальных зонах в непосредственном контакте с гипсом или ангидритом (встречаются весьма редко), либо

исходно инфильтрогенные, но с относительно высокой степенью упаривания, на что косвенно указывает положительная корреляция концентрации сульфатов и минерализации.

В работе на основе анализа карт гидроизогипс и гидроизопьез были выявлены основные направления фильтрационных потоков подземных вод в различных водоносных горизонтах. Обобщенный (для всех горизонтов в совокупности) поток подземных вод, очевидно, перетекающих в субгоризонтальном направлении из одних горизонтов в другие, направлен в основном с юга на север Северного Синая, в сторону генеральной дрены – Средиземного моря, а также частично в западном и восточном направлениях, в сторону заливов Акаба и Суэцкого (в том числе и к Суэцкому каналу). В среднем гидравлический уклон основного фильтрационного потока подземных вод с юга на север составляет порядка 0,002. Направление внутренних, более локальных потоков подземных вод определяется наличием повышенных и пониженных участков рельефа и, как следствие, повышенными и пониженными отметками уровней подземных вод. В качестве пониженных участков в подавляющем большинстве случаев выступают долины многочисленных вади.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Мохамед Я.Ш. и Виноград Н.А., (2021). Отслеживание естественного направления потока подземных вод на Северном Синае // С 23 XVII Большого географического фестиваля, посвященного 195-летию российского кругосветного путешествия Ф.П. Литке (1826-1829 гг.) - (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле). С. 205-209. ISBN 978-5-4386-2045-7
2. Мохамед Я.Ш. и Виноград Н.А., (2021). Районирование севера Синайского полуострова по фильтрационным свойствам дочетвертичных водовмещающих пород // Подземная гидросфера: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. –С. 93-95. DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-93-95
3. Мохамед Я.Ш. и др., (2021). Природные и техногенные факторы формирования фильтрационных потоков подземных вод Северного Синая // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. № 4. С. 71-81. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.4/3792>
4. Мохамед Я.Ш., и др., (2020). Оценка условий фильтрации через земляные плотины при изменении их параметров с использованием программы Z\_SOIL // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. № 2. С. 90-97. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.2/2863>
5. Мохамед Я.Ш., и др., (2020). Структура фильтрационных потоков подземных вод на Севере Синайского Полуострова. Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография. Том XIX / Под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Снытко. -СПБ.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена. № 36. С. 259-262. ISBN 978-5-8064-2986-6.
6. Справочное руководство гидрогеолога. Т.1. (под ред. Максимова В. М.). М.: Недра. 1967.
7. Abd El-Aal G.A., (1998). Thesise: Hydrogeology and Land Use Classification of North Sinai Peninsula with the Environmental Impact of Groundwater on Exploitation and Pollution, Egypt.
8. Abd El-Samie S. G. and Sadek M. A., (2001). Groundwater recharge and flow in the Lower Cretaceous Nubian Sandstone aquifer in the Sinai Peninsula, using isotopic techniques and hydrochemistry. Hydrogeology journal of Springer-Verlag, Vol. 09, pp. 378-389. DOI: 10.1007/s100400100140.

9. Abdallah A.M. et al., (2001). Stratigraphy of the Cenomanian and Turonian sequence of El Giddi pass, North West Sinai, Egypt. The 6<sup>th</sup> conference Geology of Sinai for Development, Ismailia, pp. 211-229.
10. Abdelaziz R. and Bakr M. I., (2012). Inverse Modeling of Groundwater Flow of Delta Wadi El-Arish. *Journal of Water Resource and Protection*, Vol. 4, pp. 432-438.
11. Abdel-Ghaffar M.K. et al., (2015). Watershed Characteristic and Potentiality of Wadi El-Arish, Sinai, Egypt. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, Vol. 4, Issue 1, pp. 1070-1091.
12. Abdel-hady A.A., and Fursich F.T., (2014). Macroinvertebrate Palaeo-communities from the Jurassic succession of Gebel Maghara, Sinai, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 97, pp. 173-193.
13. Abdel-Rahman A.A. et al., (2010). Geoelectrical Exploration to Delineate the Groundwater Occurrence in Risan Unayzah Area, North Sinai. The 6<sup>th</sup> International Symposium on Geophysics, Tanta, Egypt, pp. 144-152.
14. Abdel-Raouf O., (2014). Investigation of groundwater flow heterogeneity in fractured aquifers (Case study: Qusiema area, North Sinai). *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, Vol. 6(11), pp. 279-286.
15. Abdel-Shafy H.I. and Kamel A.H., (2016). Groundwater in Egypt Issue: Resources, Location, Amount, Contamination, Protection, Renewal, Future Overview. *The Egyptian Journal of Chemistry*, Vol. 59, No. 3, pp. 321- 362.
16. Abdulhadya Y.A., and Sayedb A.S., (2018). Evaluation of Hydrochemical Facies and Ionic Ratio of Al-Salam Canal Water and Its Relation with Watery Extracted Soil and Water Table, North Sinai, Egypt. *Octa Journal of Environmental Research*, Vol. 6(2), pp. 052-074.
17. Abo El-Fadl M.M., (2018). Monitoring of water - rock interaction and its impact on groundwater salinization at El Goura area, Northeast Sinai, Egypt. *Journal of Current Science International-CRW*, Vol. 07, Issue 02, pp. 279-292.
18. Abouelmagd A. et al., (2014). Paleoclimate record in the Nubian Sandstone Aquifer, Sinai Peninsula, Egypt. *Journal of Quaternary Research* Vol. 81, pp. 158–167.
19. AbuBakr M. et al., (2013). Use of radar data to unveil the paleolakes and the ancestral course of Wadi El-Arish, Sinai Peninsula, Egypt. *Journal of Geomorphology* Vol. 194, pp. 34–45.
20. Afify A.M. et al., (2019). Contribution to the stratigraphy and sedimentology of the Upper Jurassic – lower Eocene succession of the Mitla–El Giddi stretches, west Central Sinai, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, No. 125, pp. 48-68.

21. Aggour, T. A. et al., (2007). Geology of Water Resources at Wadi Geraia Basin, Sinai, Egypt. *Egyptian Journal of Geology*, Vol. 51, pp.177-204.
22. Al-Gamal S.A. and Sadek M., (2015). An assessment of water resources in Sinai Peninsula, using conventional and isotopic techniques, Egypt. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 241-257.
23. Allam A., and Khalil H., (1988). Geology and stratigraphy of the Arif El-Naqa area, Sinai, Egypt. *Journal of Geology Sciences*, No. 32, Vol. 1-2, pp. 199-218.
24. Arad A., and Kafri U., (1980). Hydrogeological Inter-Relationship between the Judea Group and the Nubian Sandstone Aquifers in Sinai and the Negev. *Israel Journal of Earth-Sciences*, Vol. 29, pp.67-72.
25. Arnous M.O., (2016). Groundwater potentiality mapping of hard-rock terrain in arid regions using geospatial modelling: example from Wadi Feiran basin, South Sinai, Egypt. *Hydrogeology Journal of Springer* Vol. 24, pp. 1375–1392.
26. Attia O.E., (1998). Evolution of El Sheikh Zuweid modern brine, north Sinai, Egypt. *Journal M.E.R.C. of Ain Shams University, Earth Sciences*, Vol. 12, pp. 188-204.
27. Barseem M.S., (2011). Delineating the Conditions of Groundwater Occurrences in the Area South Baloza, Romana Road, North West Sinai, Egypt. *Egyptian Geophysical Society (EGS) Journal*, Vol. 9, No. 1, pp. 135-143.
28. Bekhit H. M., (2015). Sustainable groundwater management in coastal aquifer of Sinai using evolutionary algorithms. *Journal of Procedia Environmental Sciences*, Vol. 25, pp. 19-27.
29. Carling P. et al., (2009). Unsteady 1D and 2D hydraulic models with ice dam break for Quaternary mega-flood, Altai Mountains, southern Siberia. *Journal Global and Planetary Change*. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.11.005.
30. Carling P. et al., (2009). Unsteady 1D and 2D hydraulic models with ice dam break for Quaternary mega-flood, Altai Mountains, southern Siberia. *Journal Global and Planetary Change*. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.11.005.
31. Climate Change Research Institute database - National Water Research Center - Ministry of Water Resources and Irrigation. The Arab Republic of Egypt. [www.mwri.org.eg](http://www.mwri.org.eg) (In Arabic) checked in 06.06.2021.
32. Comte J. C. et al., (2016). Challenges in groundwater resource management in coastal aquifers of East Africa: Investigations and lessons learned in the Comoros Islands, Kenya, and Tanzania. *Journal of Hydrology*, Vol. 5, pp. 179–199.

33. Dada P. O. O. et al., (2016). Effects of soil physical properties on soil loss due to manual yam harvesting under a sandy loam environment. *Journal of international soil and water conservation research*, Vol. 4, pp. 121-125.
34. Database of the Egyptian General Authority for Mineral Resources, (2018). El Weili - Cairo. The Arab Republic of Egypt.
35. Effat H.A. and Hegazy M.N., (2012). Mapping potential landfill sites for North Sinai cities using spatial multicriteria evaluation. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, Vol. 15, Issue 2, pp. 125-133.
36. El Alfy M., (2010). Integrated geostatistics and GIS techniques for assessing groundwater contamination in Al Arish area, Sinai, Egypt. *Arab Journal of Geosciences*, Vol. 5, pp. 197-215.
37. El-Alfy M., and Merkel B., (2006). Hydrochemical Relationships and Geochemical Modeling of Groundwater in Al Arish Area, North Sinai, Egypt. *Journal of American Institute of Hydrology*, Vol. 22, No. 1-4, pp. 47-62.
38. El-Beialy S.Y. et al., (2010). Palynology of the Mid-Cretaceous Malha and Galala formations, gebel El Minshara, North Sinai, Egypt. *Journal SEPM (Society for Sedimentary Geology)*, Vol. 25, pp. 517-526.
39. Elbeih S. F., (2015). An overview of integrated remote sensing and GIS for groundwater mapping in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 6, pp. 1–15.
40. El-Bihery M. A. and Lachmar T. E., (1994). Groundwater quality degradation as a result of overpumping in the delta Wadi El-Arish area, Sinai Peninsula, Egypt. *Journal of Environmental Geology*, Vol. 24, pp. 293-305.
41. Elewa H. H. et al., (2013). Runoff Water Harvesting Optimization by Using RS, GIS and Watershed Modelling in Wadi El-Arish, Sinai. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 2, Issue 12.
42. Elewa H.H., and Qaddah A.A., (2011). Groundwater potentiality mapping in the Sinai Peninsula, Egypt, using remote sensing and GIS-watershed-based modeling. *Hydrogeology Journal of Springer-Verlag*, Vol. 19, pp. 613–628.
43. El-Kashouty M. et al., (2011). Characterization of the aquifer system in the northern Sinai Peninsula, Egypt. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, Vol. 4(3), pp. 41-63.
44. El-Rayes A.E. et al., (2017). Morphotectonic controls of groundwater flow regime and relating environmental impacts in Northwest Sinai, Egypt. *Arab Journal of Geosciences*, Vol. 10, pp. 401-420.

45. El-Samanoudi M.A. et al., (2011). Assessment of Groundwater Resources in North Eastern Sinai Peninsula Constrained by Mathematical Modeling Techniques. Fifteenth International Water Technology Conference, IWTC-15 2011, Alexandria, Egypt.
46. Embaby A.A., and El-Barbary S.M., (2011). Evaluation of Quaternary aquifer for agricultural purposes in northwest Sinai, Egypt. *Journal of American Science*, Vol. 7(3), pp. 344-361.
47. Fathy K. et al., (2014). Gravity observations at Sinai Peninsula and its geophysical and geodetic applications. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, Vol. 2, pp. 223-233.
48. Feldman H.R. et al., (2012). Taxonomy and Paleobiogeography of late Bathonian Brachiopods from gebel Engabashi, Northern Sinai. *Journal of Paleontology*, Vol. 86, Issue 2, pp. 238-252.
49. Gad M. I. and Khalaf S., (2015). Management of Groundwater Resources in Arid Areas Case Study: North Sinai, Egypt. *Journal of Water Resources*, Vol. 42, No. 4, pp. 535-552.
50. Geriesh M.H. et al., (2015). Geoenvironmental Impact Assessment of El-salam Canal on the Surrounding Soil and Groundwater Flow Regime, Northwestern Sinai, Egypt. *CATRINA Journal the Egyptian Society for Environmental Sciences*, Vol. 12 (1), pp. 17-29.
51. Gheith H. M. and Sultan M. I., (2000). Assessment of the renewable groundwater resources of Wadi El-Arish, Sinai, Egypt: modelling, remote sensing and GIS applications. *Journal of Remote Sensing and Hydrology*, No. 267, pp. 451-454.
52. Ghoubach S.Y., (2013). Contribution to the hydrogeology of the Lower Cretaceous aquifer in east Central Sinai, Egypt. *Journal of King Saud University – Science*, Vol. 25, Issue 2, pp. 91-105.
53. Heintz M. and Brinkmann P. J., (1989). A groundwater model of the Nubian aquifer system. *Journal of Hydrological Sciences*, Vol. 34, No. 4.
54. <https://www.youm7.com>
55. Ibrahim E.H. et al., (2018). Geoelectric study for Quaternary groundwater aquifers in northwest Sinai, Egypt. <https://www.researchgate.net/publication/23810031>.
56. Idris H., (2000). Short account of groundwater as the source for famous springs in Egypt. *Hydrogeology*, 1 T., 76, pp. 389-404.
57. Issar A. and Bein A., (1972). On the Ancient Water of the Upper Nubian Sandstone Aquifer in Central Sinai and Southern Israel. *Journal of Hydrology*, Vol. 17, pp. 353-374.

58. Issar A.S. and Bruins H.J., (1983). Special Climatological Conditions in the Deserts of Sinai and the Negev during the Latest Pleistocene. Elsevier Science Journal of Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Vol. 43, pp. 63-72.
59. Jamel A. A., (2016). Analysis and Estimation of Seepage through Homogenous Earth Dam without Filter. Diyala Journal of Engineering Sciences, Vol. 09, No. 02, pp. 38-94. <https://www.iasj.net/iasj?func=article&aId=113108>.
60. Japan International Cooperation Agency (JICA), (1992). Main report: North Sinai Groundwater Resources Study in the Arab Republic of Egypt. <https://www.jica.go.jp/english/>
61. Jun-Feng F. U. and Sheng, J. A., (2009). Study on Unsteady Seepage Flow through Dam. Elsevier journal of hydrodynamics, Vol. 04, No. 21, pp. 499-504. DOI: 10.1016/S1001-6058(08)60176-6.
62. Jun-Feng F. U. and Sheng, J., (2009). A Study on Unsteady Seepage Flow through Dam. Elsevier journal of hydrodynamics, Vol. 04, No. 21, pp. 499-504. DOI: 10.1016/S1001-6058(08)60176-6.
63. Khaled M.A. et al., (2016). Geoelectrical and hydrogeological study to delineate the geological structures affecting the groundwater occurrence in Wadi El Khariq Basin, Northwest El Maghara, north Sinai, Egypt. Arab journal of Geosciences- Springer, DOI 10.1007/s12517-015-2286-5.
64. Kosinova I. I. and Kustova N. R., (2008). Teoriya i metodologiya geoekologicheskikh riskov [Theory and methodology of geoecological risks]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology, no 2, pp. 189-197 (In Russ.)
65. Maged M. E. et al., (2016). Estimation of flash flood using surface water model and GIS technique in Wadi El-Azariq, East Sinai, Egypt. Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences, manuscript under review for the journal.
66. Magesh N. S. et al., (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. Journal of Geoscience Frontiers, Vol. 3, No. 2, pp. 189-196.
67. Mekawy M.S., (2012). Unusual Factor Affecting the Preservation of Fossils from Northern Sinai, Egypt. Journal of Earth Science Climate Change, Vol. 3, Issue 3, doi:10.4172/2157-7617.1000121.

68. Mekawy M.S., (2013). Taphonomy of Aptian-Albian Beds in the Gebel Mistan, Maghara Area, Northern Sinai, Egypt. *Journal of Earth Science Climate Change*, Vol. 4, Issue 2, ISSN:2157-7617.
69. Milewski A. M., (2008). Remote Sensing Solutions for Estimating Runoff and Recharge in Arid Environments. *Dissertations*, 795. <http://scholarworks.wmich.edu/dissertations/795>
70. Mingqian Li et al., (2019). Hydrochemical Evolution of Groundwater in a Typical Semi-Arid Groundwater Storage Basin Using a Zoning Model. *Water Journal*, Vol. 11, No. 1334.
71. Ministry of State for Environmental Affairs - Environmental Affairs Agency, North Sinai Governorate - Environmental Affairs Administration, (2007). Environmental characterization of North Sinai Governorate. North Sinai Governorate. The Arab Republic of Egypt. (In Arabic)
72. Ministry of Water Resources and Irrigation, (2016). "Atlas of Climate Changes for the Sinai Peninsula". Nile Corniche - Imbaba. The Arab Republic of Egypt. [www.mwri.org.eg](http://www.mwri.org.eg) (In Arabic) checked in 06.06.2021.
73. Ministry of Water Resources and Irrigation, (2017). "Atlas of torrents of the valleys of the Sinai Peninsula". Nile Corniche - Imbaba. The Arab Republic of Egypt. [www.mwri.org.eg](http://www.mwri.org.eg) (In Arabic) checked in 06.06.2021.
74. Mohamed A.I., and Hassan M.A., (2017). Mapping of Groundwater Quality in Northern Sinai Using GIS Technique. *Merit Research Journal of Agricultural Science and Soil Sciences*, Vol. 5(2), pp. 024-039.
75. Mohamed L. et al., (2015). Structural Controls on Groundwater Flow in Basement Terrains: Geophysical, Remote Sensing, and Field Investigations in Sinai. *Springer journal of Surv. and Geophys*, DOI 10.1007/s10712-015-9331-5.
76. Mohamed Ya. Sh. et al., (2021). Justification for Effective Water Planning and Management in the North of the Sinai Peninsula, Egypt // *Journal Bioscience Biotechnology Research Communications*. Vol. 14, No. 03, pp. 986-992. DOI: <http://dx.doi.org/10.21786/bbrc/14.3.13>
77. Moustafa A.R., and Khalil S.M., (1995). Rejuvenation of the Tethyan passive continental margin of northern Sinai: deformation style and age (Gebel Yelleq area). *Journal of Tectonophysics- Science Direct*, Vol. 241, Issue 3-4, pp. 225-238.

78. Omran E., (2016). A stochastic simulation model to early predict susceptible areas to water table level fluctuations in North Sinai, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* Vol. 19, Issue 2, pp. 235-257.
79. Peters E. et al., (2018). Tracers Reveal Recharge Elevations, Groundwater Flow Paths and Travel Times on Mount Shasta, California. *Journal of Water*, Vol. 10, No. 97.
80. Ramadan S. M. et al., (2013). Effect of Aswan High Dam (AHD) Storage on The Integrated Management of Water Resources in Egypt. *The Egyptian Int. J. of Eng. Sci. and Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 1517-1524.
81. Reddy V. R. et al., (2018). A Water–Energy–Food Nexus Perspective on the Challenge of Eutrophication. *Journal of Water*, Vol. 10, No. 101.
82. Rosenthal E. et al., (1990). Definition of groundwater flow patterns by environmental tracers in the multiple aquifer system of southern Arava Valley, Israel. *Journal of Hydrogeology*, Vol. 117, pp. 339-368.
83. Rosenthal E. et al., (2007). The hydrochemical evolution of brackish groundwater in central and northern Sinai (Egypt) and in the western Negev (Israel). *Journal of Hydrology-Science Direct*, Vol. 337, pp. 294– 314.
84. Ruiz G., (2015). Estimation of the groundwater recharge in the aquifer of the Mexico City. *Journal Procedia Environmental Sciences*, Vol. 25, pp. 220 – 226.
85. Salem M. G. and El-Sayed E. A. H., (2017). Historical Satellite Data Analysis to Enhance Climate Change Adaption and Hydrologic Models in Egypt. *Journal of Power and Energy Engineering*, No. 5, pp. 56-71.
86. Santosh N. et al., (2016). Slope Stability Analysis with Geo5 Software for Malin Landslide in Pune (Maharashtra). *Global Journal of Engineering Science and Researches*. ISSN 2348 – 8034. <http://www.gjesr.com/Issues%20PDF/TECHNOPHILIA-2016%20-%20Jaihind%20Polytechhnic,%20Kuran,%20February,%202016/3.pdf>.
87. Seleem T. A., (2013). Analysis and Tectonic Implication of DEM-Derived Structural Lineaments, Sinai Peninsula, Egypt. *International Journal of Geosciences*, Vol. 4, pp. 183-201.
88. Senanayake I. P. et al., (2016). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Journal of Geoscience Frontiers*, Vol. 7, pp. 115-124.
89. Shata A.A., (1982). Hydrogeology of the Great Nubian Sandstone basin, Egypt. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 15, pp. 127-133.

90. Smith S. E. et al., (1997). Locating regions of high probability for groundwater in the Wadi El-Arish Basin, Sinai, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 25, No. 2, pp. 253-262.
91. Strzepek K. M. et al., (1996). Vulnerability assessment of water resources in Egypt to climatic change in the Nile Basin. *Journal of Climate Research*, Vol. 6, pp. 89-95.
92. Sultan A.S. et al., (2013). The Use of Geophysical and Remote Sensing Data Analysis in the Groundwater Assessment of El Qaa Plain, South Sinai, Egypt. 5<sup>th</sup> International Conference on Water Resources and Arid Environments (ICWRAE 5), Riyadh, Saudi Arabia pp. 292-305.
93. Sultan M. et al., (2002). Origin and recharge rates of alluvial ground waters, Eastern Desert, Egypt. <https://www.researchgate.net/publication/255270881>
94. Sultan M. et al., (2011). Modern recharge to fossil aquifers: Geochemical, geophysical, and modeling constraints. *Journal of Hydrology* Vol. 403, pp. 14–24.
95. Szczesny J. and Truty A., (2004). Dam surveillance and maintenance – general approach and case studies. <http://www.symposcience.eu/exl-doc/colloque/ART-00001147.pdf>.
96. UNEP. (2010). Africa Water Atlas. Division of Early Warning and Assessment (DEWA). United Nations Environment Programme (UNEP). Nairobi, Kenya.
97. Valenzuela L., (2016). Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile. *Obras y Proyectos*, Vol. 19, pp. 6-22. <http://200.14.96.130/index.php/obrasyproyectos/article/view/116>.
98. Vengosh A., and Rosenthal E. (1993). Saline Groundwater in Israel: Its Bearing on the Water Crisis in the Country. *ELSEVIER Journal of Hydrology*, Vol. 156, pp. 389-430.
99. Wahid A. et al., (2016). Geospatial Analysis for the Determination of Hydro-Morphological Characteristics and Assessment of Flash Flood Potentiality in Arid Coastal Plains: A Case in Southwestern Sinai, Egypt. *Journal Earth Sciences Research*, Vol. 20, No. 1, pp. E1-E9.
100. Wanas H. A., (2008). Cenomanian rocks in the Sinai Peninsula, Northeast Egypt: Facies analysis and sequence stratigraphy. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 52, pp. 125-138.
101. Water Resources Research Institute database - National Water Research Center - Ministry of Water Resources and Irrigation. The Arab Republic of Egypt. [www.mwri.org.eg](http://www.mwri.org.eg) (In Arabic) checked in 06.06.2021.

102. Weinberger G. and Rosenthal E., (1998). Reconstruction of natural groundwater flow paths in the multiple aquifer system of the northern Negev (Israel), based on lithological and structural evidence. Springer-Verlag Hydrogeology Journal, Vol. 6, pp. 421–440.
103. Xu Y. Q. et al., (2003). Optimal hydraulic design of earth dam cross section using saturated–unsaturated seepage flow model. Journal Advances in Water Resources, Vol. 26, pp. 1–7. PII: S03 0 9-1 7 08 (0 2 )0 01 2 4- 0.
104. Yeh H. et al., (2016). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. Journal Sustainable Environment Research, Vol. 26, pp. 33-43.
105. Yousef A.F., and El Shenawy I.A., (2000). Environmental Monitoring of North Sinai with Emphasis on Factors Affecting the Salinity of some Sediments. Journal ICEHM2000, Cairo University, Egypt, pp. 91- 101.
106. Zhou Y. et al., (2013). Upgrading a regional groundwater level monitoring network for Beijing Plain, China. Journal Geoscience Frontiers Vol. 4, pp. 127 – 138.