

**ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»
Институт наук о Земле**

На правах рукописи

Каюкова Елена Павловна

**ОЦЕНКА ПОДЗЕМНОГО СТОКА КАК ЭЛЕМЕНТА ВОДНОГО БАЛАНСА
ПРИ КОМПЛЕКСНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

(СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЕ СКЛОНЫ КРЫМСКИХ ГОР)

Специальность 25.00.07 - Гидрогеология

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук
профессор А.Н. Павлов

Санкт-Петербург – 2017 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗУЧЕННОСТИ РАЙОНА И МЕТОДЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	13
1.1 История гидрогеологических исследований	13
1.2. Методы гидрогеологических исследований	18
1.2.1. Методические подходы	18
1.2.2. Подготовительный этап гидрогеологических исследований	19
1.2.3. Полевые гидрогеологические исследования	19
1.2.4. Методы аналитических исследований	20
1.2.4.1. Химические методы анализа	20
1.2.4.2. Инструментальные гидрохимические исследования	21
1.2.4.3. Изотопные исследования	21
1.2.5. Методика обработки данных	22
1.2.5.1. Метод среднемноголетнего водного баланса	22
1.2.5.2. Базы данных	23
1.2.5.3. Методы статистической обработки данных	24
1.2.5.4. Использование ГИС-технологий	25
1.2.5.4. Гидрохимическое моделирование.....	25
1.2.6. Анализ и синтез полученной информации	27
Выводы к главе 1	27
Глава 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕВЕРО-ЗАПАДНЫХ СКЛОНОВ КРЫМСКИХ ГОР	28
2.1. Физико-географический очерк	28
2.1.1. Общие сведения	28
2.1.2. Климат	30
2.1.3. Растительность и почвы	31
2.2. Поверхностные воды северо-западных склонов Крымских гор	31
2.2.1. Реки Крымского полуострова	31
2.2.2. Поверхностные воды бассейна р. Бодрак	33
2.2.3. Река Бодрак	33
2.2.4. Основные расчетные характеристики реки Бодрак	34
2.2.5. Формирование стока реки Бодрак	39
Выводы к главе 2	40

Глава 3. ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА	41
3.1. Геологическое строение	41
3.1.1. Основные черты геологического строения	42
3.1.2. Геологическое строение бассейна р. Бодрак.....	44
3.1.3. Стратиграфия	53
3.2. Общие гидрогеологические условия	53
3.2.1. Гидрогеологическое районирование	53
3.2.2. Гидрогеологическая характеристика бассейна р. Бодрак.....	55
Выводы к главе 3	64
Глава 4. ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД БАСЕЙНА РЕКИ БОДРАК.....	65
4.1. Гидрохимическое опробование	65
4.2. Результаты мониторинга атмосферных осадков.....	66
4.3. Гидрохимический режим поверхностных вод бассейна р.Бодрак	69
4.3.1. Химический состав водоемов (ставков)	69
4.3.2. Гидрохимический режим р. Бодрак	70
4.4. Формирование химического состава подземных вод бассейна р. Бодрак	70
4.4.1. Основные факторы формирования подземных вод	70
4.4.2. Химический состав	71
4.4.3. Ассоциации компонентов в подземных водах бассейна р.Бодрак по данным факторного анализа	81
4.4.4. Этапы формирования химического состава подземных вод	86
4.4.5. Взаимодействие вода - горная порода.....	87
4.4.6. Вероятные формы миграции химических элементов в подземных водах.....	94
4.5. Проблемы питьевого водоснабжения бассейна р. Бодрак.....	97
4.5.1. Общая ситуация	97
4.5.2. Проблемы питьевого водоснабжения д. Трудолюбовки	98
4.5.2.1. Качество питьевых вод центрального водоснабжения	98
4.5.2.2. Качество питьевых вод нецентрализованного водоснабжения	103
4.5.2.3. Комплекс мер по улучшению централизованного водоснабжения	106
Выводы к главе 4	107
Глава 5. ИЗОТОПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД ГОРНОГО КРЫМА ...	110
5.1. Общие сведения	110
5.2. Региональные сведения	112

5.3. Тритий в водах северо-западных склонов Крымских гор.....	114
5.4. Стабильные изотопы $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в природных водах бассейна р. Бодрак	116
5.4.1. Результаты изотопных исследований Горного Крыма	116
5.4.2. Изотопный состав атмосферных осадков в предгорьях Крыма	117
5.4.3. Стабильные изотопы $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ и сток р. Бодрак	119
5.4.4. Стабильные изотопы $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в подземных водах Горного Крыма	122
5.4.5. Средний изотопный состав природных вод бассейна р. Бодрак.....	123
Выводы к главе 5	125
Глава 6. ВОДНЫЙ БАЛАНС БАСЕЙНА Р. БОДРАК И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИЕ	127
6.1. Осадки (P)	127
6.2. Испарение (E)	130
6.3. Конденсация (Z)	135
6.4. Сток реки Бодрак (Y)	137
6.4.1. Поверхностный сток	137
6.4.2. Подземный сток	138
6.4.2.1. Оценка подземного стока по дебитам источников.....	139
6.4.2.2. Метод меженных гидрометрических съемок	140
6.4.2.3. Гидрохимический метод.....	144
6.4.2.4. Морфометрический способ изучения подземного стока	145
6.4.2.5. Сравнение результатов оценки подземного стока	151
6.5. Водный баланс бассейна р. Бодрак	152
Выводы к главе 6	155
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	160
ПРИЛОЖЕНИЕ:	170
1. Среднемесячные температуры по данным метеостанции пос. Почтовый.....	171
2. Среднемесячные осадки по данным метеостанции пос. Почтовый	171
3. Содержание микрокомпонентов в ставках (прудах) бассейна р. Бодрак	172
4. Содержание микрокомпонентов в водах р. Бодрак.....	173
5. Содержание микрокомпонентов в источниках бассейна р. Бодрак	174
6. Содержание микрокомпонентов в подземных водах колодцев бассейна р. Бодрак	177
7. Коэффициенты концентрации элементов в подземных водах бассейна р. Бодрак	181
8. Интенсивность водной миграции элементов в подземных водах бассейна р. Бодрак ..	182
9. Значения факторов в точках наблюдения (выборка 1)	183
10. Значения факторов в точках наблюдения (выборка 2)	184
11. Основные формы миграции химических элементов в подземных водах и атмосферных осадках бассейна р.Бодрак	185
12. Стабильные изотопы в составе природных вод Горного Крыма	186

ВВЕДЕНИЕ

Крымский полуостров располагается на юге Восточно-Европейской равнины на стыке трех материков – Азии, Африки и Европы при переходе от океанического климата к континентальному, на контакте умеренного и субтропического поясов, что определяет ландшафтное разнообразие полуострова.

Вследствие своего неповторимого природного многообразия Крым привлекателен в естественнонаучном отношении, его отличает высокая обнаженность и доступность многочисленных природных объектов (геологических, гидрогеологических, ботанических, гидрологических и др.), расположенных на небольшой территории (около 27 тыс. км²) в сейсмически активной зоне Альпийско-Гималайского пояса. В пределах полуострова встречаются породы нескольких геологических формаций, десятки литологических комплексов, полтора десятка типов рельефа, множество стратиграфических комплексов. Существенное влияние на природу Крыма оказывает карст (практически повсеместно распространенный как в горном, так и в равнинном Крыму), тектоническая раздробленность горных сооружений. Крым стал одним из наиболее интересных в геологическом отношении регионов, здесь проходили и проходят школу многие поколения геологов и естествоиспытателей разного профиля. Этому району посвящены публикации многих исследователей.

Хорошо известно, что водные ресурсы Крымского полуострова ограничены и полностью не обеспечивают питьевые и хозяйственные нужды крымского населения. Конечно, в Горном Крыму проблема не стоит столь остро, как, например, на Керченском полуострове или в Присивашье, тем не менее, в летний период даже в районах Предгорья местные жители испытывают серьезный недостаток питьевых и хозяйственных вод [70]. Положение усугубляется и тем, что на летний сезон в район прибывает большое количество студентов на учебную практику, а также отдыхающие, и в то же время у местного населения возникают дополнительные потребности в воде, необходимой на поливы и другие сельскохозяйственные нужды.

Крымские реки, несмотря на свои небольшие размеры и то, что большинство из них в летний сезон пересыхают, играют крайне важную роль в водном балансе своих территорий и, соответственно, в жизни местного населения [65, 70].

Средняя многолетняя величина естественного склонового стока в Крыму невелика (около $1,04 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$), для горной части полуострова она составляет $3,10 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$ [121]. Естественный сток – величина непостоянная и напрямую зависит от гидрометеорологических условий территории, увеличиваясь или уменьшаясь в 2-3 раза в зависимости от температуры воздуха и испарения и, в следующую очередь, от количества атмосферных осадков.

Подземные воды активного водообмена являются важным источником пресных вод в Предгорьях Крыма, их отличает повышенная чувствительность к изменению природных и антропогенных факторов. На селитебных территориях существуют серьезные проблемы с качеством питьевых вод.

В представленной работе рассматривается территория восточной части Бахчисарайского района Крыма, на которой (как и в других районах Крыма) существуют проблемы как с количеством, так и с качеством хозяйственно-питьевых вод. Необходимо понимать, является ли извечная нехватка водных ресурсов в летний период на данной территории следствием нерационального потребления или же водные ресурсы крайне ограничены, и тогда необходимо искать новые возможности и новые источники водоснабжения.

На рассматриваемой территории протекает небольшая горная река Бодрак, являющаяся самым крупным притоком р. Альмы; обе реки относятся к группе рек северо-западных склонов Крымских гор. Летом речка Бодрак обычно пересыхает, однако, несмотря на свои небольшие размеры (около 16 км), роль реки огромна, именно она определяет естественные ресурсы хозяйственно-питьевых вод восточной части Бахчисарайского района Крыма, и от нее зависят условия жизни местного населения [49, 61 - 64].

Изучение полного гидрологического цикла (численным выражением которого служит водный баланс) крайне важно для оценки естественных ресурсов подземных вод территории, особенно в районах недостаточного увлажнения, а с учетом современных политических отношений между Россией и Украиной – преобретают чрезвычайно большое практическое значение.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Малые реки и грунтовые воды отличает повышенная чувствительность к изменению природных и антропогенных факторов. Бесконтрольная эксплуатация водных объектов как источников водоснабжения в условиях недостаточного увлажнения неизбежно приводит к трансформациям количества и качества естественных водных ресурсов. Недоизученность в Крымском регионе этих вопросов, отсталые технологии водопользования и высокая водозатратность, отсутствие современных прогнозов загрязнений мотивируют находить новые подходы в развитии водохозяйственного комплекса.

Водные ресурсы Крыма ограничены и никогда полностью не обеспечивали питьевые и хозяйственные потребности полуострова. Более 50 лет водохозяйственные проблемы решались за счет днепровской воды, составляющей 70 - 80% в водохозяйственном балансе Крыма. На современном этапе приходится ориентироваться на внутренние возможности полуострова, при этом ведущим фактором стабильного развития региона становятся ресурсы подземных вод и естественного стока. Реки Крыма, несмотря на свои небольшие размеры и то, что большинство из них в летний сезон пересыхают, играют важнейшую роль в водном балансе своих территорий, при этом на Горный Крым приходится 85% ресурсов речного стока полуострова. В зависимости от метеорологических условий года (температуры воздуха, испарения, количества осадков и т.п.) естественный сток может в 2 – 3 раза увеличиваться или уменьшаться. Для максимально рационального использования естественных ресурсов полуострова жизненно необходимым становится изучение водного баланса территорий с учетом взаимодействия речного стока с грунтовыми водами, а также оценка стока.

Выбор бассейна р. Бодрак в качестве объекта исследования обусловлен расположением здесь хорошо изученного в геологическом отношении учебного полигона, на котором проходят свои учебные и производственные практики студенты геологических вузов России и ближнего зарубежья.

Объект исследования – природные воды северо-западных склонов Крымских гор (на примере реки Бодрак). **Предмет исследования** – химический и изотопный состав, свойства, количественные и качественные характеристики природных вод северо-западных склонов Крымских гор, их динамический режим.

Цель работы – выявление закономерностей формирования естественных водных ресурсов и оценка подземного стока северо-западных склонов Крымских гор на примере р. Бодрак, а также изучение химического состава подземных вод с выяснением особенностей, определяющих их токсичность.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) анализ геолого-гидрогеологических данных, гидрологических и климатических условий северо-западных склонов Крымских гор;
- 2) создание цифровой модели рельефа бассейна р. Бодрак как аналога рек северо-западных склонов Крымских гор; расчет водосборных площадей и других морфометрических характеристик модельного бассейна;
- 3) создание базы данных химического состава всех вод региона;
- 4) физико-химическое моделирование миграционных форм и степени насыщения относительно ряда минералов;
- 5) выявление закономерностей водной миграции химических элементов и их соотношений в различных гидрогеологических подразделениях;
- 6) выяснение условий формирования химического состава и исследование экологического состояния природных вод района с использованием гидрохимического моделирования и анализа изотопного состава;
- 7) изучение грунтовых вод методами гидродинамического моделирования;
- 8) разработка способа оценки и картирования элементов водного баланса горных областей с недостатком увлажнения и при дефиците информации;
- 9) сбор недостающих данных (литературных, метеоданных и др.), необходимых для оценки составляющих водного баланса; построение уравнения среднемноголетнего водного баланса бассейна р. Бодрак;
- 10) выяснение, являются ли водные ресурсы данной территории ограниченными, или их нехватка связана с нерациональным потреблением.

Научная новизна: 1. Установлены региональные динамические и гидрохимические закономерности подземного стока; 2. Впервые на изучаемой территории проведена гидрохимическая съемка, определен изотопный состав природных вод; создана оригинальная база данных. 3. Выявлены закономерности формирования химического состава подземных вод; выделена водоносная зона вулканогенно-осадочной толщи; 4. Рассчитаны соотношения миграционных форм химических элементов в подземных водах; 5. Выполнена оценка качества вод, используемых в хозяйственно-питьевых целях; 6. Предложены подходы к оценке и картированию подземного стока горных территорий

при недостатке материалов наблюдений (которые можно применить в районах с аналогичными природными условиями); 7. На основе гидрохимических данных построено уравнение среднегодового водного баланса бассейна р. Бодрак.

Фактический материал и личный вклад автора. В основу диссертационной работы положены результаты летних полевых работ в Крымском предгорье. Теоретический анализ выполнен автором на основе собственного фактического материала, собранного за 19-летний период. Кроме собственных использованы некоторые литературные данные, а также результаты наблюдений метеостанции п. Почтовый. Непосредственно автором ежегодно проводились гидрохимическая и гидродинамическая съемки, лабораторный анализ природных вод (в полевой лаборатории учебно-научной базы СПбГУ в Крыму). За годы исследований отобрано, обработано и проанализировано более 1000 гидрохимических проб природных вод (в том числе 47 проб атмосферных осадков); около 140 проб воды на стабильные изотопы ($\delta^{2}\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) и около 50 проб на тритий.

Автором диссертации создана оригинальная база данных химических анализов разового и мониторингового опробования природных вод Горного Крыма. Личный вклад автора состоит в постановке цели, задач и формулировании научных положений, непосредственном осуществлении всех теоретических, части лабораторных и полевых работ, камеральной обработки данных и заключительном обобщении результатов исследований.

Основные методы исследования. В процессе работ использован комплекс методов:

1. Полевые маршруты, включающие гидрохимическое опробование, мониторинг природных вод, динамические, климатические, гидрологические, воднобалансовые исследования; методы оценки подземного стока выбирались с учетом сезонности работ.
2. Аналитические работы: анализ гидрохимических проб проводился методами титриметрии, ICP ES, ICP MS в лабораториях учебно-научной базы СПбГУ в Крыму, кафедры гидрогеологии СПбГУ, ГУП «Водоканал» и ВСЕГЕИ; анализ изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{2}\text{H}$ проводился на масс-спектрометре DELTA^{plus} и на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro производства США (лаборатории ВСЕГЕИ, РЦ «Геомодель» СПбГУ, ЛИГФ СПбГУ); анализ на тритий проводился в РГПУ им. Герцена на низкофоновом жидкостном сцинтилляционном счетчике Quantulus-1220.
3. Обработка, систематизация, обобщение литературных материалов и метеоданных метеостанции пос. Почтовый; анализ результатов мониторинга природных вод территории, климатических и гидрологических изменений за период 1998-2015 гг. Гидрохимические и другие данные обрабатывались путем математического анализа (в т. ч. факторного), сравнительного и прогнозного анализа с

использованием комплекса стандартных программных продуктов Microsoft Office (Word, Excel), STATISTIKA 6.0, EasyTrace Pro 7.99, ArcGis версии 9.3 trial, Arc View 3.2a, Modflow (pm 53), PHREEQC Interactive 2.15.0.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. Установлены основные различия химического состава инфильтрационных вод из различных вмещающих отложений северо-западных склонов Крымских гор. Повышенные концентрации Ba, B, Ag, Sr, Sn – природная геохимическая особенность территории. Свой вклад в ряды парагенетических ассоциаций вносят: флишевые отложения (Mn, Se); породы области меланжа (Li, Rb); вулканогенно-осадочная толща (V). Повышенные содержания Zn, Fe, Cu, Pb, Ni, а также соединений азота указывают на антропогенное воздействие.

2. Результаты изучения стабильных изотопов ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) в природных водах Горного Крыма показали, что подземный сток в бассейнах рек с высотной отметкой профиля речного русла (h_p) меньше 400 м формируется преимущественно за счет зимне-весенних осадков. При этом гидрологический режим рек имеет временной сдвиг около двух месяцев по сравнению с ходом осадков. Подземный сток в летнюю межень осуществляется за счет весенних осадков.

3. На примере бассейна р.Бодрак в результате оценки элементов уравнения водного баланса выявлена региональная зависимость подземного стока речных бассейнов северо-западных склонов Крымских гор от средней высотной отметки профиля речного русла. Устойчивые водные ресурсы бассейна р.Бодрак закономерно изменяются в зависимости от климатических условий текущего года и составляют 20% от общего речного стока, что относится ко всем рекам группы ($h_p < 400$ м).

Достоверность результатов исследований обеспечивается большим объемом полевого и аналитического материала, длительностью и непрерывностью наблюдений, применением комплексных подходов и тщательностью проработки материала. Достоверность подтверждена хорошим совпадением результатов при разных подходах, непротиворечивостью итоговых заключений и выводов, которые опираются на публикации по теме исследования.

Практическая значимость работы. Работы, посвященные изучению режима и качества естественных водных ресурсов на территории Крыма в современных реалиях, приобретают особое значение. Крым (и, в частности, район исследования) способен обеспечить себя собственными водными ресурсами в случае их рационального использования. Предлагаемая в работе методика позволяет легко оценивать подземный сток рек северо-западных склонов Крымских гор. Сведения о составляющих водного баланса территории и гидрохимических особенностях природных вод помогут максимально оптимизировать водоотбор, прогнозировать изменение количества и качества естественных водных ресурсов в предгорьях Крыма, а также разумно планировать водохозяйственные мероприятия, что важно в условиях изменения климата и роста населения, а также при существующих современных противоречиях между Россией и Украиной в сфере водного хозяйства.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс Института наук о Земле СПбГУ при проведении Крымской геологической практики [60] и чтении курсов «Методы анализа природных вод», «Экологическая гидрогеология», «Охрана подземных вод», «Общая гидрогеология с основами экологии». База данных химического состава природных вод Горного Крыма используется при обучении студентов геологов и гидрогеологов.

С местными жителями, населяющими бассейн р. Бодрак, ведется постоянная консультативная работа по качеству хозяйственно-питьевых вод региона, даются разъяснения о наличии устойчивого нитратного загрязнения.

Материалы диссертации переданы в администрацию г. Бахчисарая для их использования при оценке экологического состояния природных вод, для оперативного обеспечения хозяйства Бахчисарайского района геологической, гидрологической и гидрогеологической информацией при решении вопросов охраны водных ресурсов, при ведении гидрогеологических работ и т.п. Разработанные в диссертации методы, фактические данные и полевые материалы использовались в работе Бахчисарайского межрайонного управления водного хозяйства Республики Крым.

Апробация работы. Основные результаты диссертации изложены в докладах Междунар. конференции «Полевые студенческие практики в системе естественного образования вузов России и зарубежья» (Крым, 2002); III Междунар. конференции «Экологическая геология и рациональное недропользование» (СПб, 2003). II Междунар. конференции «Полевые практики в системе высшего профессионального образования» (Крым, 2007); Междунар. симпозиума «Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы» (СПб, 2007); III Междунар. конференции «Полевые практики в системе

высшего профессионального образования» (Алтай, 2009); Научн. конференции «Комплексные проблемы гидрогеологии» (СПб, 2011); Междунар. конференции «Карстовые системы севера» (п. Голубино, 2011); XI Междунар. семинара «Геология, геоэкология, эволюционная география» (СПб, 2011); IV Междунар. конференции «Полевые практики в системе высшего профессионального образования» (Крым, 2012); II Научн. конференции «Комплексные проблемы гидрогеологии» (СПб, 2013); XII Междунар. семинара «Геология, геоэкология, эволюционная география» (СПб, 2014); XIII Междунар. семинара «Геология, геоэкология, эволюционная география» (СПб, 2014); XIV Междунар. семинара «Геология, геоэкология, эволюционная география» (СПб, 2015); Всероссийской научной конференци «Геохимия ландшафтов» к 100-летию А.И. Перельмана (МГУ, 2016).

Публикации. По теме диссертационной работы существует 41 публикация, в том числе - 11 в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и приложения; изложена на 189 страницах, содержит 53 рисунка и 40 таблиц; список литературы из 161 наименования.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю профессору А.Н. Павлову, д.г.-м.н. В.В. Куриленко, членам Крымской АН – д.г.-м.н. Ю.Г. Юровскому и д.г.-м.н. В.В. Юдину, к.г.-м.н. А.А. Шварцу, д.г.-м.н. М.В. Чарыковой, д.г.-м.н. Р.Э. Дашко, к.г.-м.н. П.К. Коносовскому, к.г.-м.н. А.А. Потапову, к.г.-м.н. И.Л. Хорхордину, к.г.-м.н. Т.А. Барабошкиной, к.г.н. Г.В. Пряхиной, а также преподавателям Крымской геологической практики - В.В. Аркадьеву, И.К. Котовой, К.А. Волину, Е.Б. Морозовой и др. за участие и поддержку, оказанную автору. Соискатель благодарит сотрудников ЛИГФ СПбГУ – Г.М. Ельцову и Э.М. Прасолова, сотрудников Ресурсного центра «Геомодель» – И.В. Токарева и И.В. Крайнюкову, при участии которых выполнено большое количество исследований на стабильные изотопы, а также Е.М. Нестерова и М.А. Кулькову – сотрудников РГПУ им. Герцена, в Междисциплинарном ресурсном центре которого проводился анализ водных проб на содержание трития.

Глава 1. СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗУЧЕННОСТИ РАЙОНА И МЕТОДЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. История гидрогеологических исследований

Началом геологического изучения Крыма можно считать работы русских ученых-путешественников К. Габлица и П.С. Палласа, посетивших Крым в 70-90-е годы XVIII века (Габлицль К. Физическое описание Таврической области по ее местоположению и по всем трем царствам природы., 1785; Паллас П.С. Краткое физическое и топографическое описание Таврической области, 1795).

После Крымской войны 1853-1856 гг. были предприняты специальные работы по изучению Крыма, в результате которых Г.Д. Романовским было дано систематическое описание геологии Крыма (Геологический очерк Таврической губернии и обзор Крымского полуострова относительно условий для артезианских колодцев. Горный журнал, 1867). В 1891 г. Н.А. Головкинским опубликован труд - Гидрогеологические исследования в Таврической губернии.

На рубеже XIX-XX вв., проводились работы по составлению первой геологической карты, возглавляемые К.К. Фохтом. В начале 20-30-х годов геологическую съемку проводили А.Д. Архангельский, Н.А. Блохин, В.В. Меннер, М.М. Соколов, К.Р. Чепиков. В 1935-1937 гг. по материалам геологических съемок В.В. Коцюбинской, Г.А. Лычагиным, М.В. Муратовым была составлена сводная геологическая карта Крымского полуострова.

В 1916-1917 гг. вышло шесть выпусков «Материалов по водным изысканиям в Крыму» по результатам масштабных исследований речных долин и поверхностного стока, которые выполнялись сотрудниками партии Крымских водных изысканий (Г.В. Федоровым, Н.Н. Павловским, М.В. Потаповым и др.) [38]. Большое значение в то время имела вышедшая в 1915 г. монография Н.В. Рухлова «Обзор речных долин горной части Крыма», включающая карты, чертежи, рисунки; в ней были приведены сведения о многих источниках Горного Крыма.

В 1947 г. была представлена первая гидрогеологическая карта полуострова, над которой трудились В.В. Колюбинская, И.Т. Поляков и М.В. Гамалий. С 1945 по 1956 гг. обширные гидрогеологические работы осуществлялись силами сотрудников Крымского геологического отделения (Южная экспедиция Министерства геологии), Крымводхоза и отделения геологии Крымского филиала АН СССР.

В 60-е годы широкие гидрогеологические исследования проводились известным гидрогеологом С.В. Альбовым, в результате которых опубликованы брошюра об использовании пресных вод Крыма [5], монография «Гидрогеология Крыма» [4], выполнены сводные гидрогеологические карты Крыма (1956); совместно с Н.В. Поляковой составлен кадастр подземных вод Крыма с объяснительным текстом к регистрационной карте.

В 1963 г. в монографии «Гидрогеология Крыма и перспективы его нефтегазоносности» под редакцией В.Г. Ткачук появилась схема гидрогеологического районирования Крымского полуострова, разработанная Е.А. Ришес [24].

В 60-е годы в стране сформировалось новое научное направление – учение о подземном стоке, теоретические обоснования которого были разработаны Б.И. Куделиным и отражены в основных его работах [86, 87, 117]. Однако, метод расчленения гидрографов для оценки питания грунтовых вод не очень подходил для часто пересыхающих малых рек Крыма. Изучением подземного стока в Горном Крыму занимались – Д.И. Кочерин, И.Г. Глухов, М.В. Чуринов, Ю.И. Шутов, В.Н. Дублянский, В.Д. Приблуда.

Геология, гидрогеология, тектоника, геоморфология Крыма продолжительное время изучались многими исследователями. До сих пор не потеряли своей актуальности фундаментальные труды, вышедшие в издательстве «Недра»: под редакцией М.В. Муратова - «Геология СССР», т. 8, Крым, 1969 г. [22] и под редакцией В.Г. Ткачук «Гидрогеология СССР», т. 8, Крым, 1971 г. [25]. Коллектив авторов тома 8 «Гидрогеологии СССР» состоял из сотрудников Министерства геологии УССР, Украинского геологоразведочного института и Института минеральных ресурсов Министерства геологии УССР.

В томе 8 «Гидрогеологии СССР» - содержится детальная характеристика гидрогеологических и инженерно-геологических условий Крымского полуострова, составленная на основании большого фактического материала (полученного при проведении фундаментальных региональных исследований) с учетом результатов новейших на тот период разработок. Этот том так и остался лучшим из всех существующих монографий крымской гидрогеологической тематики, фактические данные из тома 8 до сих пор используются при выполнении производственных отчетов и написании научных статей. После развала Советского Союза столь масштабных исследований Крым больше не видел.

Одним из наиболее популярных и интересных в геологическом отношении районов стал юго-западный Крым, который приобрел статус учебного полигона для основных геологических вузов России и ближнего зарубежья. Здесь же в районе Второй (Внутренней) гряды Крымских гор в бассейне р. Бодрак (относящейся к рекам северо-западного склона

Крымских гор) располагается полигон геологической практики Санкт-Петербургского государственного университета. В 2017 г. [60]. Институт наук о Земле СПбГУ отметит 65-летие Крымской учебной практики.

Неподалеку в районе д. Прохладное располагаются учебные базы Московского государственного университета и Российского государственного геологоразведочного университета - РГГРУ (МГРИ, МГГА и МГГРУ) с опорными геологическими полигонами.

Первенство в выборе района принадлежит МГРИ (МГГРУ). Впервые учебная геологическая практика студентов МГРИ проведена в Бахчисарайском районе Крыма в 1934 г. Она была организована по инициативе заведующих кафедрами общей геологии и исторической геологии профессоров Е.В. Милановского и Г.Ф. Мирчинка. Заслуга в выборе места для проведения практики принадлежит Е.В. Милановскому [133].

В 60 – 70 е годы прошлого века на территории юго-западного Крыма (бассейны рек Бодрак, Кача, Альма) учебную практику проводили уже 32 вуза и техникума (практически все учебные организации геологического профиля Европейской части СССР). В бассейне р. Бельбек в течение многих лет проходили учебную практику студенты Ленинградского горного института им. Г.В.Плеханова (Санкт-Петербургского Горного университета).

Юго-западный Крым привлек внимание геологов тем, что это район с большим числом интереснейших геологических объектов с разнообразными по литологическому составу осадочными сериями мезозоя и кайнозоя, содержащими множество разнообразных окаменелостей. Здесь сочетаются участки моноклиналичного и сложного складчатого залегания слоев, широко проявлен эффузивный и интрузивный магматизм. В разработке организационных и методических основ практики, популяризации ее среди других вузов принадлежит члену-корреспонденту АН СССР профессору М.В. Муратову, который около 20 лет осуществлял научное руководство практикой МГРИ [133].

По мнению профессора В.А. Прозоровского «Горный Крым самой природой создан для обучения геологии: разнообразие рельефа, горных пород, тектонических структур, характера обнаженности, проявлений полезных ископаемых и т. д. уже на протяжении более двух столетий привлекают к себе внимание отечественных геологов, в частности, преподавателей геологических вузов».

По мнению М.Ю. Пушаровского «Крымские разрезы палеогена, мела и юры - это классика с точки зрения стратиграфии. Здесь же очень наглядно представлены разнообразные тектонические деформации. Великолепно выраженные квесты - подлинный геоморфологический феномен. Хотя теперь взгляды на тектонику и геологическую историю

Крыма совершенно иные, я продолжаю считать, что с точки зрения восприятия основ полевой геологии, да и геологии вообще, это идеальное место».

Геологи Ленинградского (Санкт-Петербургского) государственного университета обосновались в бассейне р. Бодрак в 1952 г. и с тех пор ни разу не пропустили ни один полевой сезон! Инициатором проведения геологической практики в Крыму выступил декан геологического факультета ЛГУ Н.М. Синицын. В 1952 г. примерно 90 студентов 2 курса с преподавателями З.Г. Балашовым, Е.А. Балашовой, А.Д. Миклухо-Маклаем, Ш.В. Бутц, В.А. Сергеевым, Г.С. Поршняковым, Р.Н. Кочуровой, лаборантами А.А.Вейдеман и В.В. Германович разместились в д. Скалистое на западном склоне Баклинской куэсты. Первый начальник практики доцент Б.П. Бархатов поселился в д. Трудолюбовке, став основателем современного опорного полигона СПбГУ [6].

В результате многолетних полевых работ лучших представителей геологической академической науки появилось большое количество публикаций, авторами которых являются М.В. Муратов, О.А. Мазарович, В.С. Милеев, В.Н. Шванов, В.А. Прозоровский, Г.С. Бискэ, А.С. Моисеев, Н.В. Короновский, А.М. Никишин, А.И. Коротков, Б.П. Бархатов, Г.С. Поршняков, А.Д. Миклухо-Маклай, А.С. Семенова, В.В. Аркадьев, Е.Ю. Барабошкин, М.Ю. Никитин, С.Н. Болотов, В.В. Юдин, К.М. Седаева, Т.П. Майорова, В.Н. Комаров, В.Б. Караулов, В.М. Цейслер и многие-многие другие исследователи.

И в настоящее время в предгорьях Крыма продолжают начатые в прошлом веке разноплановые геологические исследования (о чем свидетельствуют все новые и новые публикации МГУ, СПбГУ, ВГУ и других вузов России и зарубежья, однако гидрологическим, гидрогеологическим и гидрохимическим исследованиям не уделяется должного внимания. Существует ряд работ, посвященных изучению подземных и поверхностных вод Горного Крыма, исследованию подземного стока и карстовых процессов, имеющих отношение главным образом к району Главной гряды. Авторами этих публикаций явились - П.М. Шликарь, Р.А. Филенко, И.Г. Глухов, В.Н. Дублянский, Ю.И. Шутов, Б.А. Вахрушев, А.Б. Климчук и др. Систематические исследования крымского карста ведутся со второй половины XX в., связь карстовых образований с формированием водных ресурсов была замечена еще задолго до этого. Изучение карстовых явлений в Крыму и их роли в формировании водных ресурсов полуострова связано с такими именами как Д.И. Щербаков, А.А. Крубер, П.А. Двойченко, Н.А. Гвоздецкий, М.В. Чуринов, Б.Н. Иванов и др.

Некоторые преподаватели геологических вузов в процессе студенческих практик по геологическому картированию вели гидрогеологические исследования на опорных

полигонах (гидрогеологические наблюдения являются обязательным элементом геологической съёмки), о чем свидетельствуют существующие публикации.

В 1973 г. вышло замечательное небольшое учебное пособие А.И. Короткова «Гидрогеологические условия района Куйбышево – Голубинка», в котором приведены сведения о химическом составе поверхностных и подземных вод полигона ЛГИ, а также дана характеристика существующего и перспективного водоснабжения. Отдельный раздел посвящен методическим вопросам по полевым гидрогеологическим наблюдениям [81]. В 1995 г. в качестве учебного пособия появилась брошюра того же автора о гидрогеологических условиях Главной гряды Крымских гор [82].

Имеется обзорная статья В.М. Семеновой «Гидрогеологические условия междуречья Бодрак и Кача» (1997 г.) [113], изданная геологическим факультетом МГУ, в которой дана общая характеристика подземным водам и приведены около двух десятков химических анализов природных вод уникального геологического полигона.

В 2000-2005 гг. В.Ю. Березкиным и Т.А. Барабошкиной (МГУ) проводились работы по эколого-геологической оценке качества ресурса геологического пространства территории бассейна р. Бодрак, при которых особое внимание уделялось природным водам (основной акцент был сделан, преимущественно, на источники, используемые для централизованного водоснабжения сел района). В 2011 г. Т.А. Барабошкиной и В.Ю. Березкиным выпущена монография «Эколого-геологическое картографирование территории бассейна р. Бодрак (Крымско-Кавказская горная зона)» [8].

В последние десятилетия успешно изучаются карстовые процессы Горного Крыма, основанные на идеях спелеогенеза. В 2013 г. вышла фундаментальная монография «Гипогенный карст предгорного Крыма и его геоморфологическая роль» [78], в которой на основе современных исследований доказана гипогенное происхождение карстовых образований в водоносных отложениях Внутренней гряды Крымских гор. Возникновение и развитие данного направления стало возможным благодаря работам целого ряда исследователей, таких как: В.Н. Дублянский, Г.А. Максимович, Б.А. Вахрушев, Г.Н. Амеличев, А.Б. Климчук, Ю.В. Дублянский, К. Шпетль и многие др.

Представленная работа посвящена изучению гидрогеологических условий Горного Крыма, формированию химического и изотопного состава подземных вод, исследованию и оценке подземного стока, она включает живой учебный материал, далеко не первый год используемый студентами СПбГУ при написании соответствующих глав в заключительные отчеты по Крымской геологической практике (автор с 1998 г. обеспечивает гидрогеологическую составляющую практики, проводимой СПбГУ для студентов 2 курса).

К сожалению, исследования носят сезонный характер, поскольку привязаны к студенческой практике и ограничены двумя летними месяцами – июнем и июлем.

1.2. Методы гидрогеологических исследований

1.2.1. Методические подходы

Расположение района исследования в области активного водообмена предопределило методику исследований. Наряду с подземными водами планировалось изучать поверхностные воды, а также атмосферные осадки, поскольку в данной области все природные воды активно взаимодействуют. Так как р. Бодрак является одной из группы рек северо-западных склонов Крымских гор, ее водосборный бассейн выделен как типичный бассейн (или отдельная пространственная единица), в котором потоки подземных вод контролируются овражно-балочной и речной сетью. Такие методологические приемы отражены в работах [40, 83, 140]. По мнению Л.М. Корытного, бассейны рек - наиболее объективная естественная основа решения разного рода задач [83].

Бассейновый подход при оценке речного стока дает возможность максимально достоверно оценить процессы формирования речного стока, анализировать природные закономерности изменения химического состава и качества вод изучаемого бассейна. Все естественные природные воды и мигрирующие с ними химические элементы в пределах условно устойчивых границ определенного речного бассейна находятся в постоянном взаимодействии.

Для оценки естественных водных ресурсов территории бассейна р. Бодрак был использован метод водного баланса. Границы водосборного бассейна определялись по линиям водоразделов. Конечно границы поверхностного и подземного водосборов, вероятно, полностью не совпадают, тем не менее, из-за сложности определения подземного водосбора при расчетах и анализе стока было принять, что они совпадают. При этом не стоит забывать, что ошибки могут быть достаточно существенными, так как р. Бодрак относится к категории малых рек, а в районе имеется достаточное количество карстующихся пород, то есть возможен водообмен между соседними водосборными бассейнами.

Комплексные гидрогеологические исследования в Горном Крыму проводились в рамках практики по геологическому картированию (гидрогеологические наблюдения

являются обязательным элементом геологической съёмки), при этом особое внимание придавалось водным ресурсам территории.

Методической основой диссертационной работы стал системный подход, который включал четыре этапа: *первый этап* (подготовительный); *второй этап* - полевые работы; *третий этап* – анализ отобранных проб; *четвертый этап* - обработка полученных материалов. С учетом того, что работы проводились 19 лет, каждый из этих этапов складывался из целого ряда отдельных работ в каждый конкретный год исследования.

1.2.2. Подготовительный этап гидрогеологических исследований

Подготовительный этап заключался в сборе и обобщении имеющейся разноплановой информации по Горному Крыму. Были проработаны фундаментальные труды по геологии и гидрогеологии Крымского полуострова, которые вошли в список литературы представленной диссертации. Климатические данные (температура, количество атмосферных осадков, влажность и т. п.) первоначально были получены непосредственно на метеостанции пос. Почтовый Бахчисарайского района, а с 2005 г. такие данные появились в свободном доступе в архивах погоды ряда сайтов [123, 124]. На использованную публичную информацию даны ссылки.

Этот этап включал также подготовку к полевому сезону - организация полевой гидрохимической лаборатории (реактивы, приборы), подготовка к полевым маршрутным исследованиям – разработка маршрутов, подготовка тары для отбора проб и т.п.

1.2.3. Полевые гидрогеологические исследования

Полевые исследования в бассейне р. Бодрак носят мониторинговый характер и проводятся с 1998 г. по настоящее время, они включают в себя:

- маршрутные исследования с комплексом наблюдений;
- пробоотбор;
- гидрохимические исследования;
- гидрологические наблюдения и гидрометрические работы;
- ежегодные режимные наблюдения;
- специальные виды работ.

Первоначально маршрутные работы проводились в пределах учебного полигона СПбГУ в рамках геологической съёмки и включали изучение различных водных объектов, таких как источники, колодцы, скважины, поверхностные водоемы, ручьи и р. Бодрак.

При описании обнажений отмечали водоупорные и водопроводящие участки; выделяли различные литолого-стратиграфические толщи, определяющие различие

фильтрационных свойств (трещиноватость, плотность, пористость, выветрелость, закарстованность, раздробленность, и др.), на основании чего были выделены гидрогеологические подразделения по условиям циркуляции подземных вод (поровые, трещинные) [14, 57]. Непосредственно на месте отбора пробы с помощью портативных приборов фирмы HANNA определяли pH, Eh, удельную электропроводность, t°C.

В процессе полевых работ были определены основные элементы водоносных горизонтов и водоносных зон (области питания, распространения и разгрузки), изучались трещиноватость горных пород (протяжённость, густота и генезис трещин), коры выветривания, определяли их зональность. Наряду с этим в маршрутах выполнялись геоморфологические и геоботанические наблюдения. На р. Бодрак проводили измерение расходов и гидрохимические исследования.

В дальнейшем изучаемая территория была значительно расширена и вышла далеко за пределы учебного полигона, кроме подземных вод большое внимание уделялось атмосферным осадкам, так как именно с них начинается формирование подземных вод Горного Крыма.

В условиях полевой химической лаборатории объемным (титриметрическим) методом начиная с 1998 г. ежегодно определяются концентрации некоторых основных компонентов (хлор, гидрокарбонаты, кальций) и жесткость, в последние годы инструментальным методом определяется натрий, в отдельные года определялись сульфаты и нитраты. С 2006 г. начинается серьезное изучение изотопного состава всех природных вод района (поверхностных, подземных и атмосферных осадков).

1.2.4. Методы аналитических исследований

1.2.4.1. Химические методы анализа

Химические методы анализа применяли для определения ряда макрокомпонентов. Определения проводили по методикам (согласно действующим ГОСТ) в полевой лаборатории учебно-научной базы СПбГУ в Крыму и в сертифицированной лаборатории кафедры гидрогеологии СПбГУ.

Объемным (титриметрическим) методом определялась концентрация макрокомпонентов Cl^- , HCO_3^- , Ca^{2+} , жесткость. К объемным методам относят методы количественного анализа, основанные на измерении количества реагента, требующегося для завершения реакции с определенным количеством определяемого вещества. Количество аналита, вступившего в реакцию, определяется по объему прибавленного титранта, концентрация которого известна.

Точность титриметрического анализа определяется правильностью определения точки эквивалентности, т.е. того момента, когда в процессе титрования количество стандартного раствора титранта становится теоретически строго эквивалентным количеству определяемого вещества согласно уравнению химической реакции. Точность также зависит от правильно приготовленных реактивов.

Весовой метод (которым определяли сульфаты) основан на осаждении сульфатов в кислой среде хлористым барием в виде сернокислого бария. Метод весьма трудоемок (проводится в течение 2 суток), однако обладает высокой точностью определения (± 2 мг/дм³ SO₄²⁻).

1.2.4.2. Инструментальные гидрохимические исследования

Содержания микрокомпонентов в природных водах (от 20 до 49 элементов) и катионов (Na⁺, K⁺, Ca²⁺ и Mg²⁺) измерялись методами ICP ES (атомно-эмиссионный спектрометр ICAP61E) и ICP MS (масс-спектрометр Agilent 7500) в лаборатории ГУП «Водоканал», и в 2010 г. в лаборатории ВСЕГЕИ. Всего на микрокомпоненты было отобрано около 300 проб, после отбора образцы консервировались азотной кислотой из расчета на 100 мл пробы 2 мл азотной кислоты (2%) [14, 57]. Пределы обнаружения (в мг/л) для катионов Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ - 0,001; 0,005; 0,005; 0,0001 соответственно.

Для определения SO₄²⁻ использовали портативный колориметр DR/890 Hach. Метод основан на измерении интенсивности светового потока, прошедшего через окрашенный раствор. Перед работой прибор калибровался, для чего внутрь колориметра помещали кювету с дистиллированной водой и фиксировали значение ZERO (100% трансмиссии, 0% поглощения). Сульфатные ионы определялись в виде BaSO₄ с помощью гликолевого реагента (раствор BaCl₂ в смеси гликоля и этилового спирта). Гликолевый реагент, введенный в анализируемый раствор, осаждает сульфаты в виде BaSO₄ и делает возможным колориметрическое определение сульфатов. Для уменьшения влияния примесей создавалась солянокислая среда (pH ~ 2,5-2,8).

Концентрация нитратов определялась электрохимическим методом на портативном иономере «И-500» с помощью ионоселективного электрода (предел допускаемой относительной погрешности измерения концентрации – 2 ед. рХ).

1.2.4.3. Изотопные исследования

Измерение стабильных изотопов проводилось в разных лабораториях: пробы вод р. Бодрак, отобранные в 2006 г., анализировались в лаборатории ВСЕГЕИ; аналитические

работы проводились на масс-спектрометре DELTA^{plus}. Прибор DELTA^{plus} с 1996 г. является стандартом в масс-спектрометрии стабильных изотопов благодаря своей чувствительности и точности; абсолютные погрешности определения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ - $\pm 1,5\text{‰}$ и $\pm 0,2\text{‰}$ соответственно.

Пробы 2011-2014 гг. анализировались на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro производства США в изотопной лаборатории геологического факультета СПбГУ (ЛИГФ СПбГУ) и Ресурсном центре СПбГУ «Геомодель». Неопределенность измерений, выполненных на лазерном анализаторе изотопного состава воды Picarro L-2120-i, составляет $\pm 0,1\text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 1\text{‰}$ по $\delta^2\text{H}$.

В качестве стандартов использованы внутрилабораторные образцы сравнения, привязанные к стандартам МАГАТЭ V-SMOW (Венский стандарт среднеокеанической воды), GISP (гренландский лед) и SLAP (стандарт легких антарктических осадков).

Пробы на тритий анализировались в РГПУ им. Герцена на низкофоновом жидкостном сцинтилляционном счетчике Quantulus-1220 (предназначенном для измерения низких уровней). Всего проанализировано около 50 проб (большая часть в 2009 г.).

Концентрации трития в природных водах выражаются в тритиевых единицах (ТЕ), при этом 1 ТЕ соответствует 0,118 Бк/л [131].

Образцы для изотопного анализа отбирались в небольшие стеклянные бутылочки с водонепроницаемыми завинчивающимися крышками (без какой-либо консервации). Всего за период исследования было выполнено около 150 анализов изотопного состава.

1.2.5. Методика обработки данных

1.2.5.1. Метод среднегодового водного баланса

Метод среднегодового общего водного баланса разработал для артезианских вод Б.И.Куделин (1960). При замедленных скоростях движения и больших сроках водообмена колебания ресурсов артезианских вод связаны только с многолетними изменениями климата:

$$P_o = Y_o + Z_o, \quad (1)$$

где P_o – норма осадков; Y_o – норма речного стока; Z_o – норма испарения.

Значения P_o , Y_o , Z_o являются нормой, если они вычислены за многолетний период такой продолжительности, при увеличении которой полученное среднее значение существенно не меняется.

Для речных бассейнов, питающих или дренирующих водоносные горизонты уравнение примет вид:

$$P_o = Y_o + Z_o \pm U_o, \quad (2)$$

где U_o – изменение влагозапасов (инфильтрация или разгрузка).

При многолетнем осреднении отрицательные и положительные значения компенсируются и норма изменений влагозапасов (U) стремится к нулю.

Метод водного баланса отражает закон сохранения материи: для любого замкнутого пространства, разность между количеством воды, поступающей внутрь него и вышедшей наружу должна равняться увеличению или уменьшению ее количества внутри данного пространства. Методы расчета элементов водного баланса описаны в главе 5.

1.2.5.2. Базы данных

В процессе обработки результатов полевых и аналитических исследований была создана единая база гидрохимических данных на основе программного пакета «Excel». База данных включила имеющиеся в наличии сведения о всех природных водах района исследования. База данных состоит из двух разделов, в которых отдельно представлены макрокомпоненты и микрокомпоненты. Это связано с тем, что широкие исследования на содержание микрокомпонентов в воде проводились только в 2005-2008 гг., лишь в эти годы удавалось добыть деньги на дополнительные исследования.

Каждому изучаемому водному объекту на территории бассейна р. Бодрак и прилегающих территорий дан свой собственный оригинальный номер - код точки.

По номеру точки опробования можно судить о типе водного объекта. Изучаемые родники пронумерованы числами, которые начинаются с цифры 1; колодцы и скважины пронумерованы числами, которые начинаются с цифры 3; с цифры 5 начинается нумерация ставков; цифрой 6 отмечены места отбора проб реки Бодрак, цифрой 7 – различных ручьев и водотоков.

Каждый водный объект имеет GPS привязку, полученную при полевых работах. Многие водные объекты поставлены на режим – их химический анализ проводится ежегодно, а некоторых - несколько раз за сезон.

По материалам созданной базы данных подготовлены методические материалы, которые используют студенты на геологической практике при написании главы «Подземные воды» в общий отчет и при составлении гидрогеологической колонки.

Для характеристики макрокомпонентного состава природных вод использована традиционно применяемая в гидрогеологии формула Курлова, в которую входят значения минерализации вод (в г/л), рН и диапазон содержания макрокомпонентов (в экв. %).

1.2.5.3. Методы статистической обработки данных

Обработка результатов аналитических исследований химического состава всех природных вод региона проведена методами математической статистики с использованием компьютерных программ «Statistica 6.0» и «Excel».

Были рассчитаны стандартные статистические параметры распределения химических элементов в поверхностных и подземных водах. В случае подземных вод были отдельно обработаны массивы данных по химическому составу вод, приуроченных к породам различных водоносных комплексов (четвертичный водоносный горизонт, подземные воды нижнемеловых отложений и локальные зоны обводнения в породах таврической и эскиординской серий). В случае поверхностных вод – суммарный массив данных и отдельные массивы по водам р. Бодрак и водам ставков.

Для обработки массива данных по химическому составу подземных вод Крымского полигона применен факторный анализ, который эффективен при исследовании вещественного состава. При этом в модели факторного анализа предполагается взаимосвязь измеряемых величин (они коррелируют друг с другом), что обусловлено некими причинами (величиной, процессом, фактором), которые непосредственно измерить нельзя. Факторный анализ сводит обширный числовой материал к нескольким независимым и простым факторам [11, 84].

Химический состав природных вод характеризуется совокупностью ряда химических элементов (анионов и катионов). Концентрации химических элементов контролируются некоторыми независимыми переменными (факторами), которые невозможно непосредственно измерить: климатом, геологической принадлежностью водоносной толщи и т.п. Однако изменчивость факторов вызывает вариабельность элементов, однонаправленные изменения которых будут скоррелированы, что поможет выявить процессы (факторы), приведшие к формированию данного химического состава воды.

Экологическая оценка гидрохимических данных питьевых вод осуществлялась по санитарно-гигиеническим критериям. Оценка базируется на величинах нормативных предельно допустимых концентраций (ПДК) согласно СанПин 2.1.4.1074-01, разработанных на основе гигиенического нормирования по показателям вредности [161].

1.2.5.4. Использование ГИС-технологий

Первоначально, с помощью картографической и навигационной программы Google SasPlanet, из Google Maps был получен небольшой участок спутникового изображения, включающий бассейн р. Бодрак; после чего карта была переведена в цифровую форму.

В процессе работы над картой были оцифрованы изолинии рельефа, дороги, водотоки, а также отрисованы водоёмы района исследования (ставки). Векторизация выполнялась с использованием EasyTrace Pro 7.99 free edition.

Каждой оцифрованной горизонтали в атрибутивной таблице была присвоена соответствующая высота. В конечном итоге были векторизованы все утолщенные горизонталы (каждые 100 м), а также промежуточные горизонталы через каждые 20 м.

Водные объекты из построенной в Excel единой базы данных (с собственным оригинальным кодом) были привязаны при помощи программного пакета ArcView к созданной векторной карте. Далее с помощью модуля ArcMap на карте были отрисованы основные водораздельные линии (отделяющие соседние речные бассейны) и второстепенные (отделяющие небольшие водосборные площади впадающих в р. Бодрак поверхностных водотоков).

Границами водосборных площадей стали линии водоразделов, пересекающие горизонталы поверхности под прямым углом (рис. 3).

Для вычисления некоторых показателей были использованы широкие возможности программного продукта ArcGis версии 9.3 trial, который позволяет современными методами с большой точностью производить измерения длин и площадей. В результате получены гидрографические характеристики р. Бодрак (уклон речного бассейна, длина реки, извилистость), ряд морфометрических характеристик речного бассейна (площадь водосбора, длина, ширина бассейна и некоторые коэффициенты, характеризующие речной бассейн) и др.

1.2.5.5. Гидрохимическое моделирование

Гидрохимическое моделирование было проведено с использованием программного комплекса PHREEQC Interactive 2.15.0 [153], разработанного для моделирования равновесных процессов массопереноса и процесса растворения. Комплекс включает 19 элементов, 120 компонентов водного раствора, 3 газа, 21 твердую фазу.

Программа была использована для расчета концентрации (активности) компонентов, индексов насыщения подземных вод относительно ряда минералов и миграционных форм растворенных в воде химических элементов.

Основой моделирования любых гидрохимических процессов является закон действующих масс, который следует из динамического равновесия протекающих реакций: в состоянии химического равновесия отношение произведения активности продуктов реакции, в степени соответствующих стехиометрических коэффициентов, к аналогичному произведению активностей реагентов (исходных веществ) при заданных температуре и давлении есть величина постоянная [10].

Например, для реакции растворения минерала кальцита ($\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$), выражение закона действующих масс имеет вид:

$$K_{\text{CaCO}_3 (T, P)} = \frac{a_{\text{Ca}^{2+}} + a_{\text{CO}_3^{2-}}}{a_{\text{CaCO}_3}}, \quad (3)$$

где K - термодинамическая константа равновесия реакции при заданных температуре и давлении; a - активности компонентов.

Для обратной реакции (осаждения кальцита из раствора) в правой и левой частях выражения закона действующих масс реакции растворения должны стоять обратные величины ($K_{\text{прямой реакции}} = 1/K_{\text{обратной реакции}}$).

Если для реакции растворения в правой части выражения закона действующих масс вместо активностей использовать концентрации, а активность минерала принять равной 1, то соответствующая константа будет называться произведением растворимости.

В идеальных системах, в которых раствор и порода находятся в своем стандартном состоянии, активность равна концентрации. При отсутствии равновесия правая часть выражения закона действующих масс не является константой и называется произведением активности реакции P_a [10].

С приближением к равновесию ($P_a \rightarrow K$) и в состоянии равновесия раствора по отношению к рассматриваемому минералу: $P_a = K$. Для реакции растворения в состоянии недонасыщения раствора - $P_a < K$, а в состоянии пересыщения раствора - $P_a > K$. Для определения направленности протекания реакции используют отношение этих параметров, называемое квотантом реакции Q (или индексом недонасыщенности). При этом $Q = 1$ отвечает динамическому равновесию, $Q < 1$ - недонасыщению, а $Q > 1$ - пересыщению раствора относительно заданного минерала. [10, 19].

Квотант реакции (Q) представляет отношение фактического значения произведения активностей продуктов реакции, к произведению активностей исходных веществ. На практике обычно используют логарифмическую величину Q (так как зависимость « $Q - P_a$ » по мере приближения раствора к равновесию с минералом меняется экспоненциально).

1.2.6. Анализ и синтез полученной информации

На заключительном этапе проводилась интерпретация многочисленного разнопланового материала, осмысление полученных значений. Первоначально были рассмотрены результаты гидрохимических и изотопных анализов всех природных вод региона, при этом были отбракованы некачественные данные. Далее были рассмотрены определенные элементы водного баланса в отдельности, внесены необходимые поправки: осреднение значений для речного бассейна, поправки для учета высотной поясности и т.п. Затем все элементы водного баланса были сведены в одно уравнение и были предприняты попытки уравнивания его левой и правой части. Для этой цели были привлечены гидрохимические данные.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

1. В районе Второй гряды Крымских гор в бассейне р. Бодрак (относящейся к рекам северо-западного склона Крымских гор) располагается уникальный по геологическому строению район, имеющий статус учебного полигона для основных геологических вузов России и ближнего зарубежья. Полигон в гидрогеологическом отношении недостаточно изучен.
2. Водосборный бассейн р. Бодрак выделен как отдельная пространственная единица (типичный представитель группы рек северо-западных склонов Крымских гор).
3. Для оценки подземного питания часто пересыхающих малых рек Крыма классический метод оценки подземного стока - расчленение гидрографа - не подходит.
4. Методической основой комплексных гидрогеологических исследований стал системный подход, который включал четыре этапа: *первый этап* (подготовительный) – постановка задач; *второй* - полевые работы; *третий* – аналитический; *четвертый* - обработка полученных материалов, выводы и рекомендации.

Глава 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕВЕРО-ЗАПАДНЫХ СКЛОНОВ КРЫМСКИХ ГОР

2.1. Физико-географический очерк

2.1.1. Общие сведения

Крымский полуостров расположен в центре Азово-Черноморского региона. Своеобразная природа Крыма объясняется его географическим положением (в пределах



Рис. 1. Полуостров Крым [97]

44°23' и 46°19' северной широты, 32°30' и 36°40' восточной долготы), близостью моря и устройством поверхности: обширные плоские равнины чередуются с расчлененными возвышенностями, которые на юге сменяются горными массивами, круто обрывающимися к морю. Территория полуострова омывается Черным и Азовским

морями, принадлежащими бассейну Атлантического океана. Площадь Крымского полуострова 26,9 тыс. км², максимальное расстояние с севера на юг – 205 км, с запада на восток – 325 км. По характеру рельефа Крым разделяется на три главные части: южную – горную, северную – равнинную и Керченский полуостров (рис. 1). Горы, занимающие южную часть полуострова, протягиваются на 160 км вдоль Черного моря от Севастополя до Феодосии. Крымские горы невысоки (максимальная отметка – 1545 м (г. Роман-Кош)). В пределах Горного Крыма выделяются: Главная гряда, Южный берег и Предгорная гряда.

Главная гряда, состоящая из ряда горных массивов (яйл) с водораздельными платообразными поверхностями, возвышается мощным уступом верхнеюрских известняков, в которых широко развиты многочисленные карстовые формы: воронки, поля, карры, поноры, пещеры.

Предгорная куэстовая моноклиналь сложена слабодислоцированными карбонатными породами мел-палеоген-неогенового возраста. Наличие бронирующих горизонтов прочных известняковых пород, полого наклоненных к северу, обусловили образование двух ассиметричных гряд: Внутренней высотой 500–738 м и Внешней высотой до 200–350 м. Они прорезаны многочисленными реками, стекающими с Главной гряды. Широкое пространство между Главной и Внутренней грядами гор занимает Южное эрозионно-денудационное

межгрядовое понижение, в пределах которого сформировался сложнорасчлененный разноориентированный овражно-балочный рельеф. Речные долины Качи, Альмы и их притоков пересекают межгрядовое понижение в северо-западном направлении (рис. 2).

В пределах Второй (Внутренней) гряды преобладает структурный куэстовый рельеф, связанный с эрозийным расчленением мел-палеогеновых песчано-глинистых и карбонатных отложений различной прочности, широко развиты холмы, столовые плато, овраги, малые реки и временные водотоки. Абсолютные отметки от 300 до 475 м, относительные превышения до 100 м.

Внутренняя и Внешняя гряды отделены друг от друга Северным эрозийно-аккумулятивным межгрядовым понижением, возникновение которого обязано врезанием в мягкие породы верхнего эоцена боковых притоков, пересекающим понижение в поперечном направлении.

Бассейн р. Бодрак располагается в пределах Внутренней предгорной гряды Крымских гор и Южного эрозийно-денудационного межгрядового понижения (рис. 1) на северо-западном крыле Качинского поднятия. Вторая гряда представляет собой хребет с куэстовым рельефом расчлененный речными долинами, оврагами и балками.

Южное межгрядовое понижение - это сложная сеть оврагов и балок, сформированных в результате глубокой эрозии песчано-сланцевых триасово-юрских и частично среднеюрских отложений, обнажающихся на северных склонах Главной гряды Крымских гор [104, 105].

В районе Внутренней (Второй) гряды на правом берегу р. Бодрак в окрестностях д. Трудолюбовки Бахчисарайского района Крыма уже 60 лет Санкт-Петербургский Государственный университет проводит учебную геологическую практику для студентов второго курса. В центре д. Трудолюбовки располагается учебно-научная база СПбГУ.

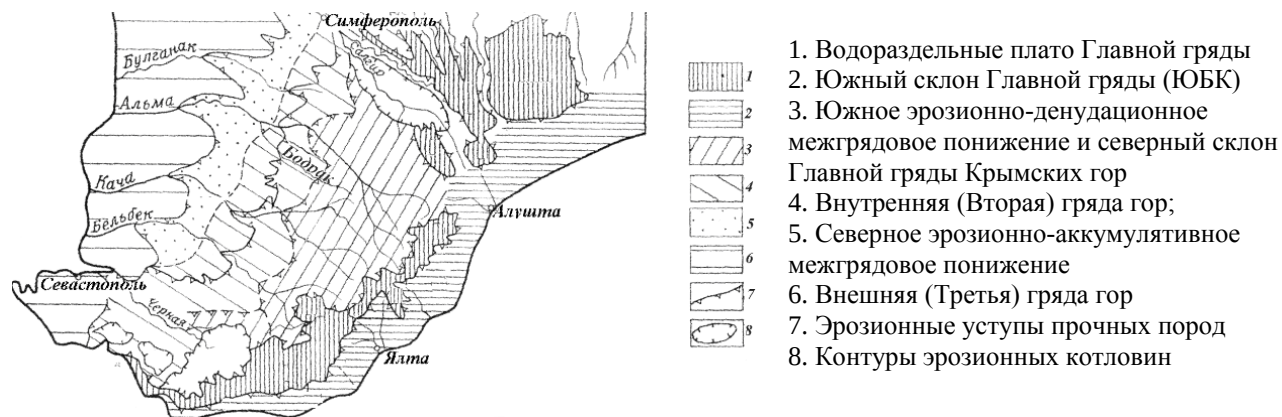


Рис. 2. Геоморфологическое районирование юго-западного Крыма [105]

2.1.2. Климат

Большое влияние на формирование климата Крымского полуострова оказывают горы, играющие барьерную роль и омывающие полуостров моря, которые оказывают смягчающее влияние, повышая среднегодовую температуру на $1,1 - 1,3^{\circ}$ относительно других районов тех же широт. На полкострове в теплый период года в виде осадков выпадает 43,6 % влаги, а в холодный - 15,5 % [116]. Зимой в Крыму выпадает меньше осадков, чем летом. Осадки в среднем составляют 27,6 % от того количества влаги, которая содержится в воздушном пространстве Крыма в течение года.

Бассейн р. Бодрак находится в районе умеренно-континентального климата. Погодно-климатические условия отличаются межгодовой и внутригодовой изменчивостью. Среднегодовые температуры за период с 1998 г. по настоящее время колеблются около $11,7^{\circ}\text{C}$, средние месячные температуры самого жаркого месяца июля - около 23°C (от $20,6^{\circ}$ до $25,4^{\circ}\text{C}$), самого холодного месяца января - 2°C (от $-1,4^{\circ}$ до $5,1^{\circ}\text{C}$) [56, приложение 1].

Норма атмосферных осадков в районе на период 1939 – 1965 гг. составляла 482 мм [125], на период 1930 – 1980 гг. - 523 мм, среднегодовые значения (1998 – 2011 гг.) - 533 мм по данным метеостанции пос. Почтовое [приложение 2].

Высотная поясность на изучаемой территории выражена нерезко, относительные превышения около 100 метров, тем не менее, с высотой основные климатические характеристики меняются. Вертикальные градиенты средней месячной температуры для горных районов Крыма, определенные Главной геофизической обсерваторией при помощи графиков зависимости температурой воздуха на станциях и их высотой, с подъемом уменьшаются в среднем на $0,62^{\circ}$ на каждые 100 м (табл. 1) [75].

Таблица 1

Вертикальные градиенты температур, $^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ [75]

январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	средние годовые
0,65	0,62	0,58	0,57	0,55	0,64	0,72	0,71	0,65	0,55	0,58	0,62	0,62

Среднегодовое количество осадков на каждые 100 м подъема возрастает на 50 – 70 мм. Годовое количество осадков испытывает естественные колебания под влиянием изменения климата Крыма [45].

Определяющее влияние на формирование климата оказывают общая циркуляция атмосферы, на которые огромное влияние оказывают отроги Азиатского (Сибирского) и Азорского антициклонов. В последнее десятилетие происходит перестройка циркуляций атмосферы (меняются центры), что приводит к региональным изменениям климата:

температуры воздуха, режима атмосферных осадков, увеличению стихийных бедствий. В настоящее время преобладает антициклональный тип погоды, связанный с Азорским максимумом [7]. Выпадение атмосферных осадков в теплый и в холодный периоды связано, главным образом, с циклонами. Наряду с общей циркуляцией атмосферы, существуют местные циркуляции (горно-долинные ветры, склоновые потоки). Преобладающие ветры в Предгорьях — северо-восточные и восточные, в меньшей степени южные, юго-западные и западные [123, 124].

2.1.3. Растительность и почвы

Благодаря особенностям рельефа небольшая территория Крыма отличается большим биологическим и ландшафтным разнообразием. Горы способствуют формированию на юге полуострова ландшафтов субсредиземноморского типа, формируют высотную поясность.

Согласно геоботаническому районированию территория относится к Средиземноморской лесной области (биоклиматическая зона низкогорной лесостепи). Предгорные возвышенности покрыты разнотравьем, кустарниковыми зарослями, лесостепной растительностью и низкорослыми дубовыми лесами. В настоящее время значительные площади заняты запущенными сельскохозяйственными угодьями.

Почвы изучаемой территории преимущественно черноземы предгорные в сочетании с дерново-карбонатными (большое содержание карбонатных частиц разного размера). Для отложений водоразделов и склонов куэстовых гряд характерны дерново-карбонатные супесчано-дресвяные почвы; для днищ оврагов, балок и долины р. Бодрак характерны черноземы карбонатные, для залесенных районов - бурые лесные почвы, в русле р. Бодрак - щебнистые аллювиальные почвы [31, 105]. Маломощные почвы (менее 0,2 – 0,3 м) подстилаются материнскими породами, послужившими основой для их образования. Характерен интенсивный геохимический отток вещества.

2.2. Поверхностные воды северо-западных склонов Крымских гор

2.2.1. Реки Крымского полуострова

Крымский полуостров небогат водными ресурсами. Водность рек Крыма определяется юго-западным и южным переносом влаги, в этом же направлении меняется сток. Крымские горы создают благоприятные условия для увеличения осадков на западных, юго-западных, южных склонах. То есть, распределение стока подчиняется ландшафтно-климатической зональности (рис. 3).

Большинство рек берут свое начало в горах на высотах 600–1100 м, где существует множество карстовых родников. На крымских яйлах речная сеть отсутствует – весь поверхностный сток переходит в подземный (карстовый). Реки северо-западных склонов (Черная, Бельбек, Кача, Альма) берут начало в западной части Крымских гор и впадают в Черное море в районе Севастополя. Это небольшие реки: среднегодовые расходы рек северо-западных склонов гор составляют 1–3 м³/сек. Летом реки обычно пересыхают и до моря не доходят. Дождевые осадки – основной источник питания рек Крыма – 45–50 % годового объема стока; снеговое питание в среднем составляет 12–23 % (до 30 % в отдельные снежные годы) [25]; на подземные воды приходится 28–36 %. Распределение стока, в общем, соответствует распределению осадков.

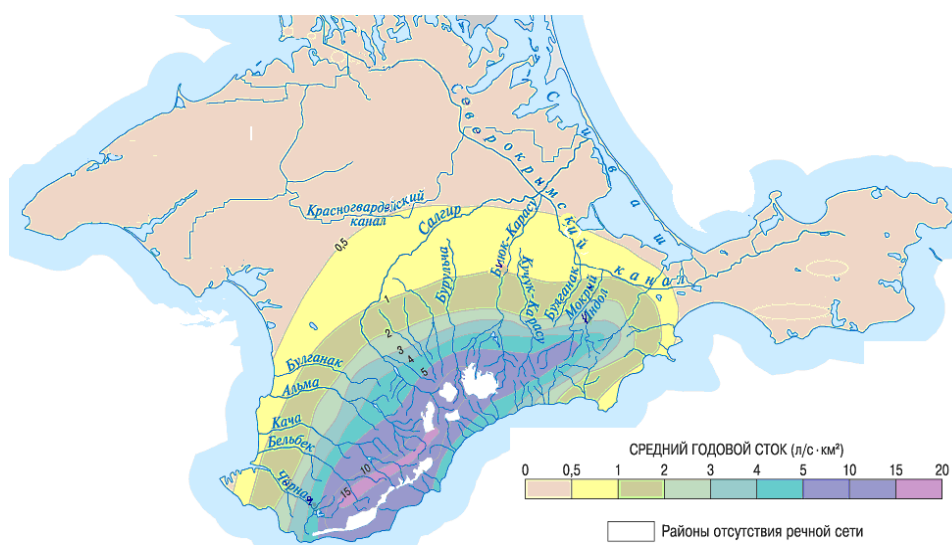
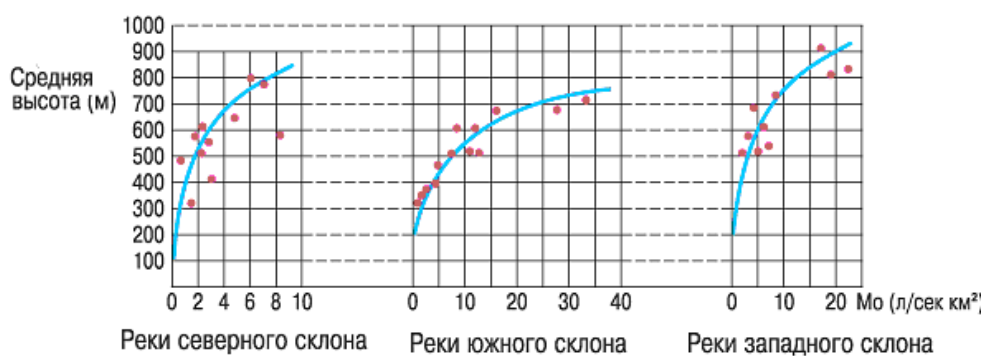


Рис. 3. Среднегодовое количество стока [1]

По оценке Гидрометслужбы Украины (2009 г.) общие ресурсы речного стока Крыма составляют 910 млн. м³, на горную часть приходится 85 % [120].

На меженный летне-осенний период приходится 5 – 20 % общего стока, на паводочный зимне-весенний – 80–95 %. В зимний период сток рек составляет 35 % годового и колеблется по отдельным бассейнам от 29 % до 45 %. Максимумы падают на летний ливневый сток. Абсолютные максимумы могут в 200–400 раз превышать среднегодовые расходы [128].

В Крыму с увеличением абсолютной отметки и количества осадков увеличивается средняя норма стока, с высотой местности снижается температура воздуха, вследствие чего уменьшается испарение и соответственно увеличивается сток. Таким образом, вертикальная зональность климатических факторов стока определяет вертикальную зональность величин стока (рис. 4).



Модули стока:
 Реки северных склонов гор (впадающие в Сиваш):
 $0,5 - 2,8 \text{ л/сек/км}^2$;
 Реки северо-западных склонов, впадающие в море:
 $0,5 - 5,5 \text{ л/сек/км}^2$;
 Реки южного склона Главной гряды:
 $0,5 - 24,0 \text{ л/сек/км}^2$.

Рис. 4. Зависимость нормы годового стока от высоты водосбора для районов Горного Крыма [1]

2.2.2. Поверхностные воды бассейна реки Бодрак

Поверхностные воды района представлены многочисленными прудами (ставками), ручьями, временными водотоками и р. Бодрак, которая формируется и протекает в пределах Бахчисарайского района Крыма, пронося свои воды мимо населенных пунктов д. Трудолюбовка и пос. Скалистое, до пос. Новопавловка, где впадает в р. Альма, текущую на запад к Черному морю. Истоки р. Альмы берут начало на северо-западных склонах Главной гряды (площадь водосбора 635 км^2 , длина 84 км, средний расход $1,25 \text{ м}^3/\text{сек}$. [120]).

Общая площадь зеркала водоемов бассейна р. Бодрак примерно 30 га. Существует около двух десятков водоемов сезонного регулирования, наиболее значительные из них: Мангушский, Воронежский, Широкий Яр, Ексиментий, Мендер, Колхозный, Юркин, Кугульчик. В них собирается большая часть поверхностного стока зимне-весеннего периода, которая может использоваться в маловодные летне-осенние периоды. В питании большинства водоемов участвуют родниковые воды. Самый большой Мраморный ставок появился в 1999 г. в бывшем карьере нуммулитовых известняков (6,0 га).

2.2.3. Река Бодрак

Истоки р. Бодрак и верхние притоки формируются за пределами учебного бассейна р. Бодрак на юго-западных склонах хребта Азарпсырт (абс. отм. - 560 м) и северных склонах г. Вольская (абс. отм. - 486 м). Рельеф здесь холмистый, эрозионно-расчлененный с многочисленными балками и оврагами, преобладают узкие водоразделы. Русло реки линейно-вытянуто с уклоном в верхнем течении 28 ‰. Заложение долины р. Бодрак происходило преимущественно по зонам трещиноватости и тектонических нарушений.

По мере падения реки (около 230 м) меняются литологический состав и возраст отложений. В среднем и нижнем течении р. Бодрак часть потока поглощается аллювиальными отложениями и трещиноватыми коренными породами. Подземные воды в

аллювиальных отложениях и в подстилающих аллювий трещиноватых породах образуют единый подрусловый поток. Местами р. Бодрак не имеет аллювиальных отложений и течет по коренным породам, в меженный период сток часто осуществляется подрусловым способом. Хорошо выработанные формы говорят о размывающей силе водных потоков, которые и сформировали современное русло.

Долина реки (ширина 200-400 м) занята садами, огородами, пашнями, после перестройки все находится в упадке, фруктовые деревья вырождаются и сады деградируют. В северной и центральной части речная долина имеет широкое уплощенное днище с хорошо выраженными поймами и уровнями I-IV террас (относимых к голоцену и позднему плейстоцену) [47, 105].

Ближе к пос. Скалистое при пересечении зоны куэст Внутренней гряды Крымских гор долина р. Бодрак сужается, приобретая каньонообразный вид. Здесь осуществляется инфлюационное и фильтрационное поглощение речных вод и временных потоков слабозакарстованными карбонатными отложениями. В областях распространения датских и среднечетвертичных нуммулитовых известняков имеется ряд небольших карстовых форм (мелкие воронки, карры, поноры, каверны). Карстовая денудация в среднем составляет 10 мм/год [35].

Перед впадением р. Бодрак в р. Альму ее продольный профиль несколько выполаживается и в нижнем течении ее уклон становится 10 ‰. Местами русло искусственно углублялось и спрямлялось, был сооружен противопаводковый вал. В недалеком геологическом прошлом (в начале четвертичного периода) р. Бодрак не была притоком р. Альмы, а текла к морю, Альма же протекала по долине нынешнего Западного Булганака. Позже, вместе с общим подъёмом Крымского полуострова, правый приток р. Пра-Бодрак врезался в бассейн соседней р. Альмы и воды верховьев Альмы устремились в долину притока р. Пра-Бодрак [105, 106]. Произошло изменение бассейнов водосбора долин р. Альмы и Бодрака, начинается интенсивное эрозионное расчленение долины р. Бодрак. В современный период площадь водосборного бассейна р. Бодрак составляет 76,5 км², длина реки Бодрак около 15,5 км, ширина летом не более 2 - 3 метров, глубина около 30 см (рис. 5). Часто в засушливые годы в летний и осенний периоды река пересыхает.

2.2.4. Основные расчетные характеристики реки Бодрак

Первоначально (с помощью программы *Google Satellite Maps Downloader*) из *Google Maps* был получен небольшой участок спутникового изображения, включающий бассейн

р. Бодрак. Далее с помощью модуля ArcMap на карте были отрисованы основные водораздельные линии (отделяющие соседние речные бассейны) и второстепенные (отделяющие небольшие водосборные площади впадающих в р. Бодрак поверхностных водотоков) (рис. 5). Границами водосборной площади служат линии водоразделов, пересекающие горизонтали поверхности под прямым углом. Затем были оцифрованы горизонтали и водные объекты (рис. 5).

Гидрографические характеристики реки (уклон речного бассейна, длина реки, извилистость), морфометрические характеристики речного бассейна (площадь водосбора, длина, ширина бассейна и некоторые другие расчетные характеристики определены следующим образом:

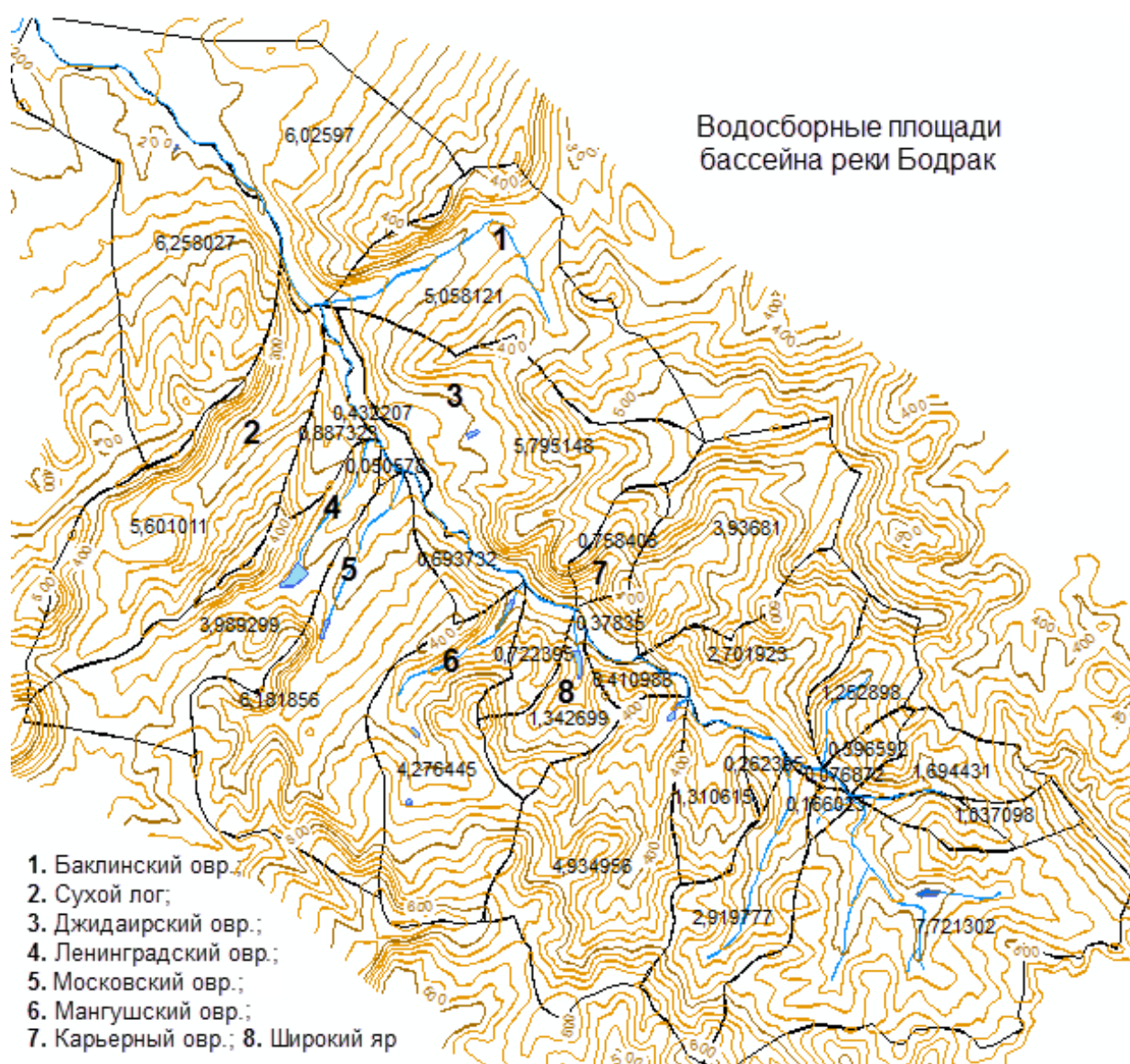


Рис. 5. Водосборный бассейн р. Бодрак

1). *Водосборная площадь р. Бодрак* (участок земной поверхности, с которой поверхностные и дождевые воды стекают в реку) вычислена как площадь горизонтальной проекции бассейна: $F = 76,53 \text{ км}^2$.

В ходе работы рассчитаны площади водосборов поверхностных водотоков бассейна р. Бодрак и межприточные пространства, площади основных из них составили: овр. Мангушский – $4,28 \text{ км}^2$, овр. Московский (Мендер) – $6,18 \text{ км}^2$, овр. Ленинградский (Шоры) – $3,99 \text{ км}^2$, овр. Баклинский (Токма) – $5,06 \text{ км}^2$, межприточная площадь левого борта р. Бодрак – $22,15 \text{ км}^2$, межприточная площадь правого борта р. Бодрак – $19,53 \text{ км}^2$ (рис. 5).

2). Периметр площади бассейна р. Бодрак – около 45 км.

3). Длина водосбора (расстояние по прямой от устья до наиболее отдаленной точки бассейна) составила: $L_B = 15,77 \text{ км}$.

4). Средняя ширина водосбора: $V_{ср.} = F / L_B = 4,85 \text{ км}$.

5). Коэффициент асимметрии бассейна характеризует неравномерность распределения площадей правой и левой частей бассейна р. Бодрак (по отношению к руслу реки) и вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{F_{\text{лев.борт}} - F_{\text{прав.борт}}}{\frac{F_{\text{лев.борт}} + F_{\text{прав.борт}}}{2}} = 0,58, \text{ где } F_{\text{лев.борт}} \text{ и } F_{\text{прав.борт}} -$$

площади левобережной и правобережной частей.

6). Коэффициент вытянутости водосбора характеризуется отношением длины р. Бодрак к средней ширине водосбора и определяется как:

$$\delta = L^2 / F = 3,1, \text{ где } L - \text{длина реки (км)} \text{ } F - \text{площадь водосбора (км}^2\text{)}.$$

7). Коэффициент озерности - отношение суммы площадей всех озер на водосборе, к общей площади водосбора: $f_{оз.} = F_{оз.} / F * 100\% \approx 0,3$.

8). Густота речной сети определяется как отношение суммарной длины водотоков (реки, ручьи) к общей площади водосбора: $\rho = \sum_{i=1}^n l_i / F = 0,5 \text{ км/км}^2$.

9). Длина реки (расстояние от истока до устья): $L_p = 15,4 \text{ км}$.

10). Расстояние вдоль русла реки от устья до наиболее удаленной точки речной сети - около 16,5 км.

11). Степень извилистости реки определялась как коэффициент извилистости:

$K_{изв} = L_p / L'$, где L_p - длина реки на рассматриваемом участке, измеренная с учетом всех извилин, а L' - длина прямой линии, соединяющей начало и конец реки.

Для р. Бодрак коэффициент извилистости составил 1,16.

12). Падение реки определялось как разность отметок истока и устья русла реки: $390 \text{ м} - 160 \text{ м} = 230 \text{ м}$. Уклон реки определялся как отношение падения реки к длине реки:

$$i = \frac{H_{\text{истока}} - H_{\text{устья}}}{L} = 0,015 = 15 \text{ ‰}.$$

13). Построен продольный профиль речного русла (рис. 6). Средняя отметка продольного профиля р. Бодрак составила 250 м.

14). С использованием GIS технологий вычислены географические координаты центра водосбора: $33^{\circ}56'23,172''\text{в. д. } 44^{\circ}48'20,895''\text{с. ш.}$

15). Средняя высота водосбора бассейна р. Бодрак $H_{\text{в}}(\text{м})$ определялась по гипсографической кривой водосбора (распределение площадей участков водосбора по высотным зонам) и вычислялась с использованием формулы:

$$H_{\text{ср.}} = \frac{f_1 H_1 + f_2 H_2 + \dots + f_n H_n}{F} = 380 \text{ м}, \quad (4)$$

где $f_1, f_2, \dots, f_n$ – частные площади водосборов (км^2), заключенные между горизонталями; $H_1, H_2, \dots, H_n$ – средние высоты между горизонталями (м), F – общая площадь водосбора р. Бодрак (км^2) (рис. 7).

16). Закарстованность водосбора f_k определялась как % площади карстующихся пород от общей площади водосбора (для вычисления использована карта В.В. Юдина): $29,84 \text{ км}^2 / 76,53 \text{ км}^2 = 0,39$ (или $\approx 40 \text{ ‰}$).

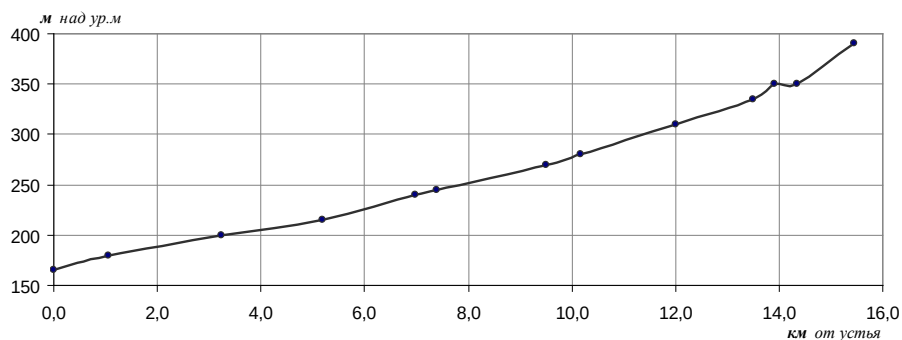


Рис. 6. Продольный профиль русла р. Бодрак

О размещении площадей водосбора по высотным зонам (рис. 7) можно судить также по гипсометрической кривой. График строился по данным измеренных площадей, лежащих между горизонталями (табл. 2), и высотным отметкам. Построения и вычисления производились с использованием ArcGis в модуле ArcMap. Гипсографическая кривая получена путем последовательного суммирования площадей, отложенных по оси абсцисс. Точки гипсографической кривой соединены плавной линией. На шкале процентов за 100% взята общая площадь бассейна.

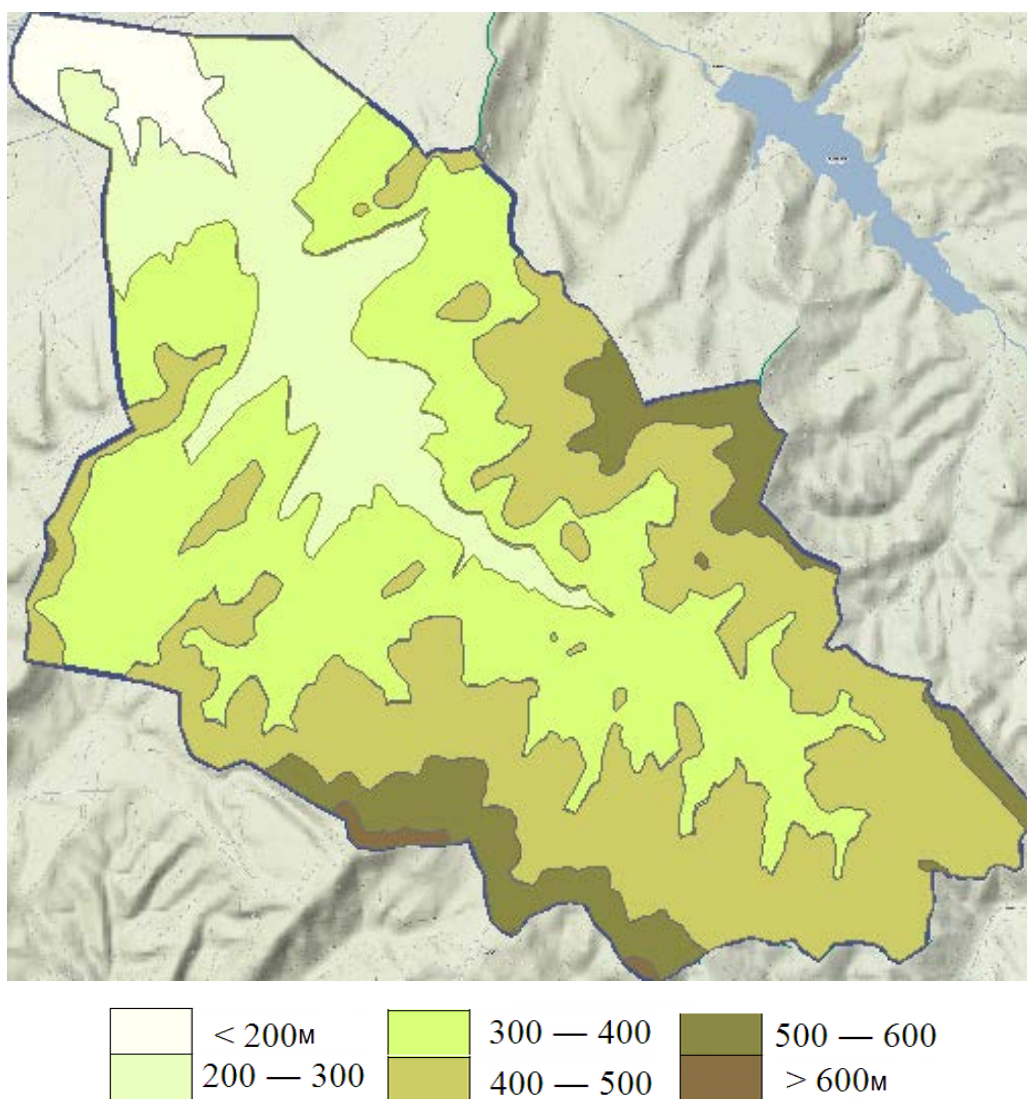
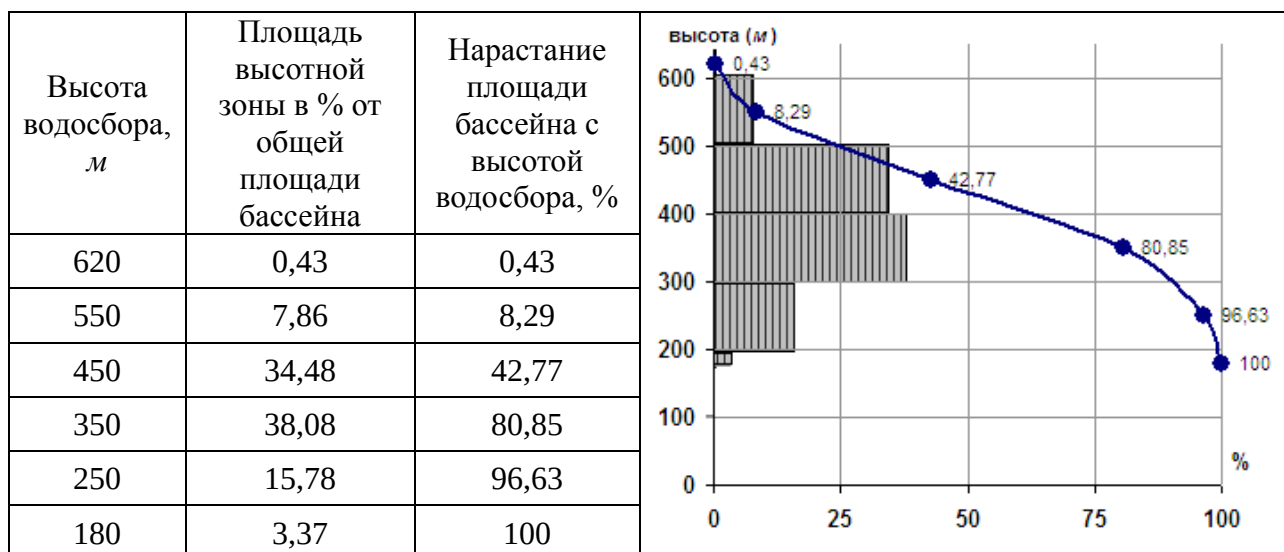


Рис. 7. Распределение площади бассейна р. Бодрак по высотным зонам

Таблица 2

Распределение площади водосбора р. Бодрак по высотным зонам



2.2.5. Формирование стока реки Бодрак

По классификации Б.Д. Зайкова [39] (основанной на связи режима реки с климатом) р. Бодрак по характеру внутригодового распределения стока относится к III группе рек с паводочным режимом. Внутригодовой ход стока рек этой группы крайне неравномерный и определяется климатическими факторами (осадками, температурой воздуха, испарением). Паводки рек на Крымских реках чаще случаются в холодный период года во время оттепелей (снеготаяние, дожди); весеннее половодье четко не выделяется, поскольку в период снеготаяния часты дожди (рис. 8).

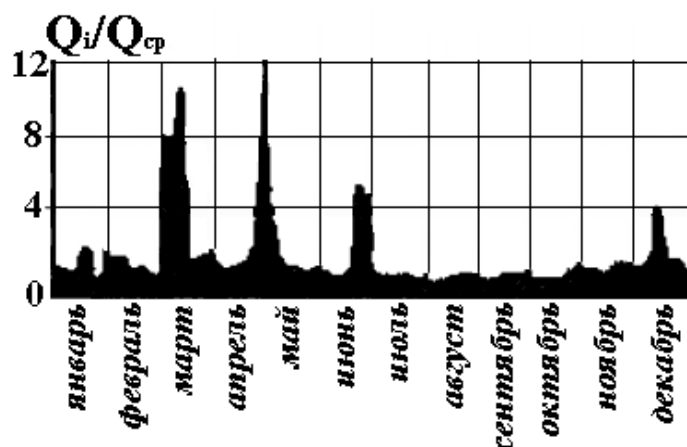


Рис. 8. Гидрограф стока Крымских рек [108]

На фоне смешанного питания (подземное, дождевое, снеговое) основным для р. Бодрак является питание за счет атмосферных осадков. Осадки частично идут на испарение и транспирацию растениями, частично - на поверхностный и подземный сток. Коэффициент дождевого стока наиболее высок после таяния снега (когда почва имеет максимальную степень увлажнения). Летом под влиянием высоких температур за счет испарения и транспирации почва сильно иссушается и повышается инфильтрационная способность. Минимальные среднемесячные расходы, когда поверхностное питание отсутствует и р. Бодрак полностью пересыхает, наблюдаются в конце лета – осенью.

Большинство паводков характеризуются кратковременностью и высоким подъемом уровней воды в реке. При особенно сильных ливнях в верховьях паводок идет все сметающей на своем пути мощной лавиной воды. Такие пики паводков (рис. 8) могут держаться до 2 ч., тогда р. Бодрак (как и другие горные реки Крыма) становится бурной и способна производить значительные разрушения. В считанные часы мелководная вяло текущая речка превращается в стремительный поток (расход может увеличиться в сотни раз).

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. Реки северо-западных склонов Крымских гор (Черная, Бельбек, Коккозка, Кача, Марта, Альма, Западный Булганак, Бодрак) относятся к категории малых; атмосферные осадки - основной источник их питания. Летом реки часто пересыхают, их среднегодовые расходы в среднем составляют около $1\text{--}3 \text{ м}^3/\text{сек}$.

2. Вертикальная зональность климатических факторов обуславливает вертикальную зональность подземного стока.

3. Река Бодрак по характеру внутригодового распределения стока относится к рекам с паводочным режимом. Паводки случаются во время оттепелей зимой (снеготаяние, дожди) и в меженный летнее-осенний период за счет ливней. Основное питание р. Бодрак - за счет атмосферных осадков. Минимальные расходы наблюдаются в конце лета – осенью.

4. По данным спутникового изображения из **Google Maps** была выполнена цифровая модель рельефа, которая послужила основой для выделения бассейна р. Бодрак. Модель получена с помощью модуля ArcMap, для чего были отрисованы основные водораздельные линии (отделяющие соседние речные бассейны) и второстепенные (отделяющие небольшие водосборные площади оврагов и впадающих в р. Бодрак поверхностных водотоков).

5. Площадь водосборного бассейна р. Бодрак составляет $76,5 \text{ км}^2$, длина реки Бодрак около 15,5 км, падение реки 230 м, уклон 15 ‰. Длина водосбора 15,77 км, средняя ширина водосбора 4,85 км, (максимальная - 8,2 км), коэффициент асимметрии 0,58. Густота речной сети бассейна р. Бодрак $0,5 \text{ км}/\text{км}^2$, коэффициент озерности 0,3.

6. Площадь со средними высотными отметками 350 м занимает 30 % общей площади бассейна, с отметками 450 м – 35 %. Средняя высота водосбора бассейна р. Бодрак 380 м. Средняя отметка продольного профиля русла р. Бодрак составила 250 м. Средняя мощность зон дренирования в бассейне р. Бодрак, полученная путем вычитания средней отметки продольного профиля речного русла из средней высоты водосбора, составила 130 м.

Глава 3. ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

3.1. Геологическое строение

3.1.1. Основные черты геологического строения

В представлениях о геологическом строении Крыма сосуществуют две основные концепции – фиксистская и мобилистская. Согласно фиксистской, Горный Крым представляет собой сложную антиклинальную структуру — мегантиклинорий, в структуре которого выделяют: складчатое ядро (сложенное породами триаса и юры), моноклиальное северное крыло (отложения мела, палеогена и миоцена), восточное периклиальное окончание (отложения олигоцена и миоцена), южное крыло мегантиклинория и часть ядра глубоко погружены под дно Черного моря. Главные элементы складчато-блоковой структуры - разноориентированные крутопадающие разломы, сформированные вертикальными движениями блоков земной коры. Долгое время была популярна благодаря признанным работам М.В. Муратова [6, 22, 99].

Мобилистская модель строения Крыма, впервые появившись в 30–40-х годах 20 в. (А.С.Моисеев, К.К.Фохт), на современном этапе обрела новую жизнь в идеях В.В.Юдина [142 - 144, 146], согласно которым Горный Крым являет собой складчато-надвиговую область. В.В.Юдиным выделены коллизионные швы (сутуры), вдоль которых произошло полное поглощение (субдукция) океанической коры палеоокеанов и столкновение (коллизия) континентов. В Крыму выделены две сутуры (структуры первого порядка): Предгорная мезозойская и Северо-Крымская палеозойская. Предгорная сутура (один из главных разломов Крыма) прослеживается по геофизическим данным под мезозойско-кайнозойскими отложениями через весь Крым и далее на Кавказ, отделяя Горнокрымский террейн от Скифской микроплиты. Шов перекрыт слабдеформированным чехлом из мезозойско-кайнозойских отложений. Строение Горного Крыма, по В.В.Юдину, определяется надвигами северного падения, редкими ретронадвигами южного наклона, сопровождаемыми складками и хаотическими комплексами [6, 142-144, 146]. Горный Крым (серия тектонических пластин, надвинутых с юга на север) - складчато-надвиговая область в составе Альпийско-Гималайско-Индонезинского пояса.

Главной структурой второго порядка в северной части Горного Крыма В.В. Юдин считает полосу слабодислоцированных толщ мел-неогенового возраста, которую он назвал Куэстовой моноклиалью. Она формирует две асимметричные гряды, прорезанные многочисленными реками [142-144].

Локальные структуры представлены, в основном, надвигами северного падения, чешуями и сильно сжатыми приразрывными складками. Размеры складок составляют от метров до сотен метров. Наиболее мелкие и интенсивные складки характерны для флиша таврической серии. Хаотические комплексы в Горном Крыму, по В. В. Юдину – это меланжи и олистостромы. Эндогенно-тектонические меланжи, развитые вдоль сместителей крупнейших надвигов, часто представляют собой мощные зоны дробления.

Самыми древними породами, обнаруженными в Крыму, являются обломки каменноугольных и пермских известняков; из коренных пород древнейшими считаются флиш таврической серии и флишеподобные образования эскиординской серии, слагающие нижний структурный этаж. Флишевые отложения расланцованы, перематы и меланжированы; это облегчает их быстрое выветривание и приводит к образованию щебнистого материала, который накапливается на склонах, в оврагах, речных долинах, у подножий гор. Выше таврического флиша залегают песчаники и конгломераты, перекрытые трещиноватыми известняками.

В позднемеловую-палеоцен-эоценовую эпоху карбонатного седиментогенеза (которая продолжалась 40 – 45 млн. лет.) были сформированы основные отложения Внутренней Предгорной гряды - ей свойственны невысокие темпы карбонатного осадкообразования. Широкое распространение получили переходные слабокарстующиеся разности карбонатных пород [13]. Во Второй гряде развиты глинисто-карбонатные отложения верхнего мела, которые перекрываются мощными толщами карбонатных пород палеогена. В Третьей гряде и далее к северу отмечаются только неогеновые и четвертичные образования.

3.1.2. Геологическое строение бассейна р. Бодрак

Бассейн р. Бодрак располагается на северо-западном крыле Качинского антиклинального поднятия. В соответствии со взглядами сторонников мобилистской теории на территории выделяются Куэстовая моноклираль и сложноскладчатая Предгорная структурная зона, входящие в состав Горнокрымского террейна.

Нижний структурный этаж (ядро Качинского поднятия) сложен триасово-юрскими интенсивно дислоцированными комплексами. В составе нижнего структурного этажа выделяют три структурно-фациальных подэтажа: один представлен сложноскладчатыми флишами (в основном опрокинутого залегания) таврической серии (T_3-J_1), второй – тектонически раздробленными флишоидами эскиординской серии (T_3-J_1), третий –

дислоцированным вулканогенно-осадочным комплексом (J_2b) мощностью более 1500 м. Первые два разделены Бодракским разломом, заложенным в байосское время.

Складчатые флишевые комплексы залегают южнее разлома. Породы эскиординской серии расположены севернее разлома, в зоне Симферопольского меланжа, характеризующегося широким развитием олистостромов. Зона Симферопольского меланжа прослеживается через весь Горный Крым вдоль Предгорной сутуры широкой полосой (1–6 км). Матрикс представлен интенсивно перетертыми и смятыми фрагментами таврического флиша, а также глинами от средней юры до нижнего мела. Кластолиты из песчаников, известняков, конгломератов и различных магматитов датируются ранним мелом, юрой, триасом, наиболее древние – раннекаменноугольным и пермским возрастом [144]. Нижнекаменноугольная глыба обнажается на правом берегу р. Бодрак у д.Трудолюбовка. Третья структурно-фациальная зона - моноклинально залегающие крутопадающие вулканогенно-осадочные комплексы, представленные лавами, туфобрекчиями, туфоаргиллитами, туфоалевролитами, туфопесчаниками, туфоконгломератами.

В породах эскиординской серии и вулканогенно-осадочной толщи бассейна р. Бодрак наблюдаются многочисленные интрузивные тела постсреднеюрского возраста. Это дайки, штоки и силлы, преимущественно основного и среднего состава.

Верхний структурный этаж (северо-западное крыло Качинского поднятия) с резким угловым несогласием перекрывает нижний. В целом это моноклираль, сложенная терригенно-карбонатными породами мелового и палеогенового возраста, полого падающая на северо-запад с углами 8–12°. В структуре этажа наблюдается ряд угловых и азимутальных несогласий.

В основании верхнего структурного этажа залегают карбонатно-терригенные отложения нижнего мела, в которых преобладают песчаники, алевролиты, органогенно-обломочные известняки; выделяется пять свит: резанская ($K_1v-h_2^1$), патильская (K_1v-h_2), коясджилгинская ($K_1h_2^2-br_2^1$), бисалинская ($K_1br_2^2-a_2$), мангушская ($K_1al_3^1$) и высокобугорская ($K_1al_3^2$) [104].

Нижнемеловые отложения можно наблюдать на южном склоне г. Сель-Бухра, на плато Патиль, на г. Шелудивой, Большом и Малом Керменах. На нижнемеловых отложениях (представленных преимущественно терригенными разностями пород) с резким несогласием залегают отложения верхнего мела–эоцена. Верхнемеловые отложения - карбонатные породы (чередующиеся мергели и известняки) мощностью до 500 м залегают моноклинально с углами 10-12°, занимая южную, центральную и северо-восточную часть

района исследования. Выделяются три свиты: белогорская ($K_{2s}-K_{2t_1}$), прохладненская ($K_{2t_1}-k$), кудринская ($K_{2st}-m$).

Завершают разрез верхнего структурного этажа широко развитые хорошо обнаженные палеогеновые и неогеновые отложения, представленные в значительной степени известняками. Палеогеновые отложения состоят из пачек индивидуального вещественного состава с различной геоморфологической выраженностью, в разрезе выделяют четыре свиты – белокаменская ($P_{1d}-m$), бахчисарайская (P_{2t}) качинская (P_{1i}) и симферопольская (P_{2l}) [104, 134].

Четвертичные отложения перекрывают породы обоих структурных этажей. По генезису это делювиальные, пролювиальные и аллювиальные образования, представленные песками, гальками, валунами, суглинками и глинами.

3.1.3. Стратиграфия

Палеозойская эратема

В конце палеозойского периода сформировалось складчатое палеозойское основание Горного Крыма, отложения которого погружены на большую глубину. На изучаемой территории в породах мезозойско-кайнозойского возраста обнаружены реликты пород палеозойского возраста (экзотические глыбы известняков).

Мезозойская эратема

Триасовая и юрская системы

Терригенно-глинистые и карбонатные породы триасовой и юрской систем слагают значительные пространства описываемой территории (рис. 9, 10, 11), занимая её центральную и южную часть [22, 99, 144].

Таврическая серия (T_3-J_1 tv)

Таврическая серия (верхний триас—лейас) - самая древняя толща Горного Крыма, которая представляет собой мощную толщу терригенного флиша, формирующего нижнюю (основную по мощности) часть мезо-кайнозойского разреза складчатого сооружения Горного Крыма.

Породы таврической серии широко распространены в южной части бассейна р. Бодрак (рис. 10), они сильно дислоцированы и перемяты, рассечены разломами и смяты в складки. Отложения представлены терригенным флишем, состоящим из ритмично чередующихся терригенных пород, каждый ритм состоит из слоя темно-серого или черного тонкоплитчатого аргиллита, алевролита и плотного средне-мелкозернистого песчаника серо-желтого, желто-зеленого, коричневого цветов.

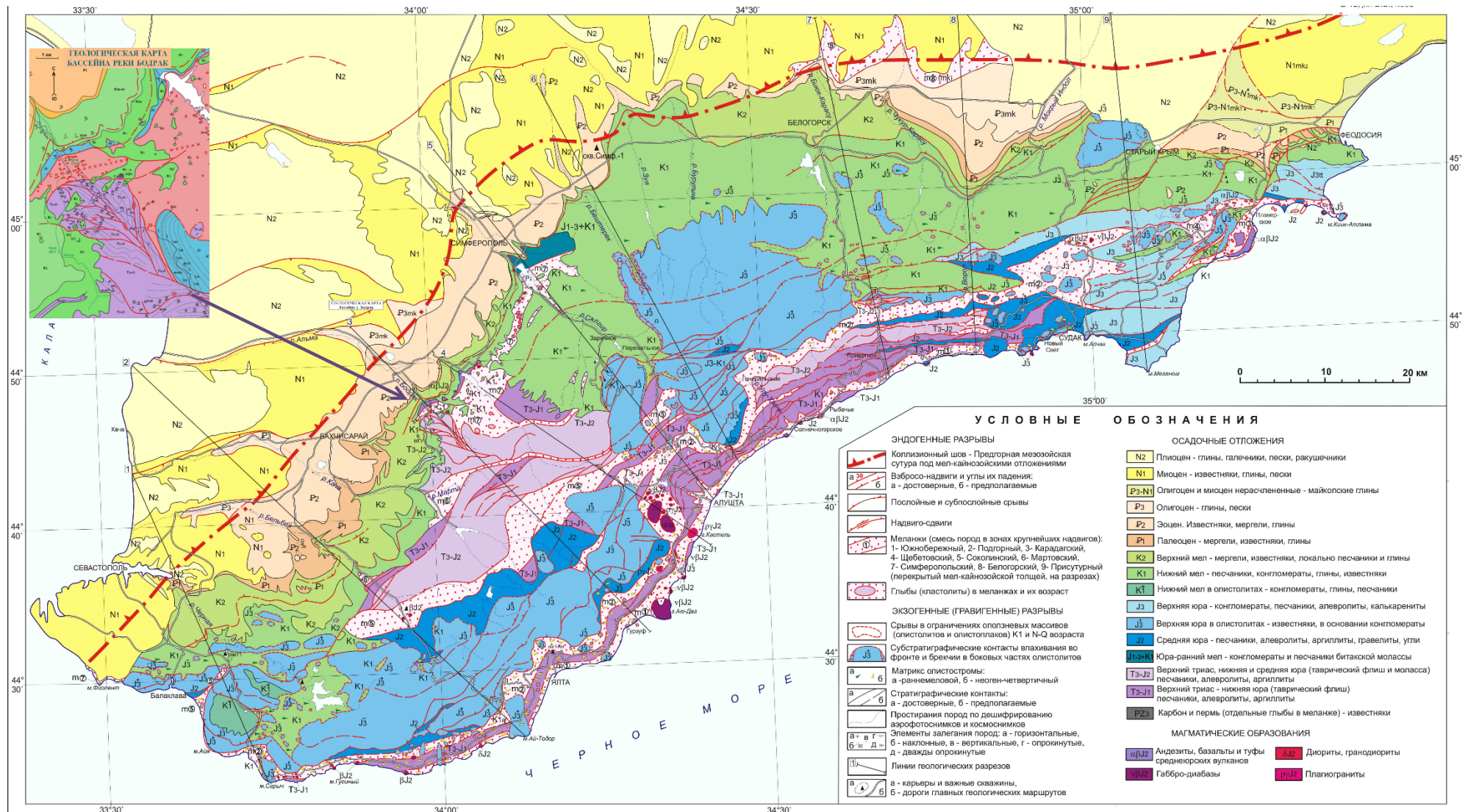


Рис. 9. Геологическая карта Горного и Предгорного Крыма (Юдин, 2009)

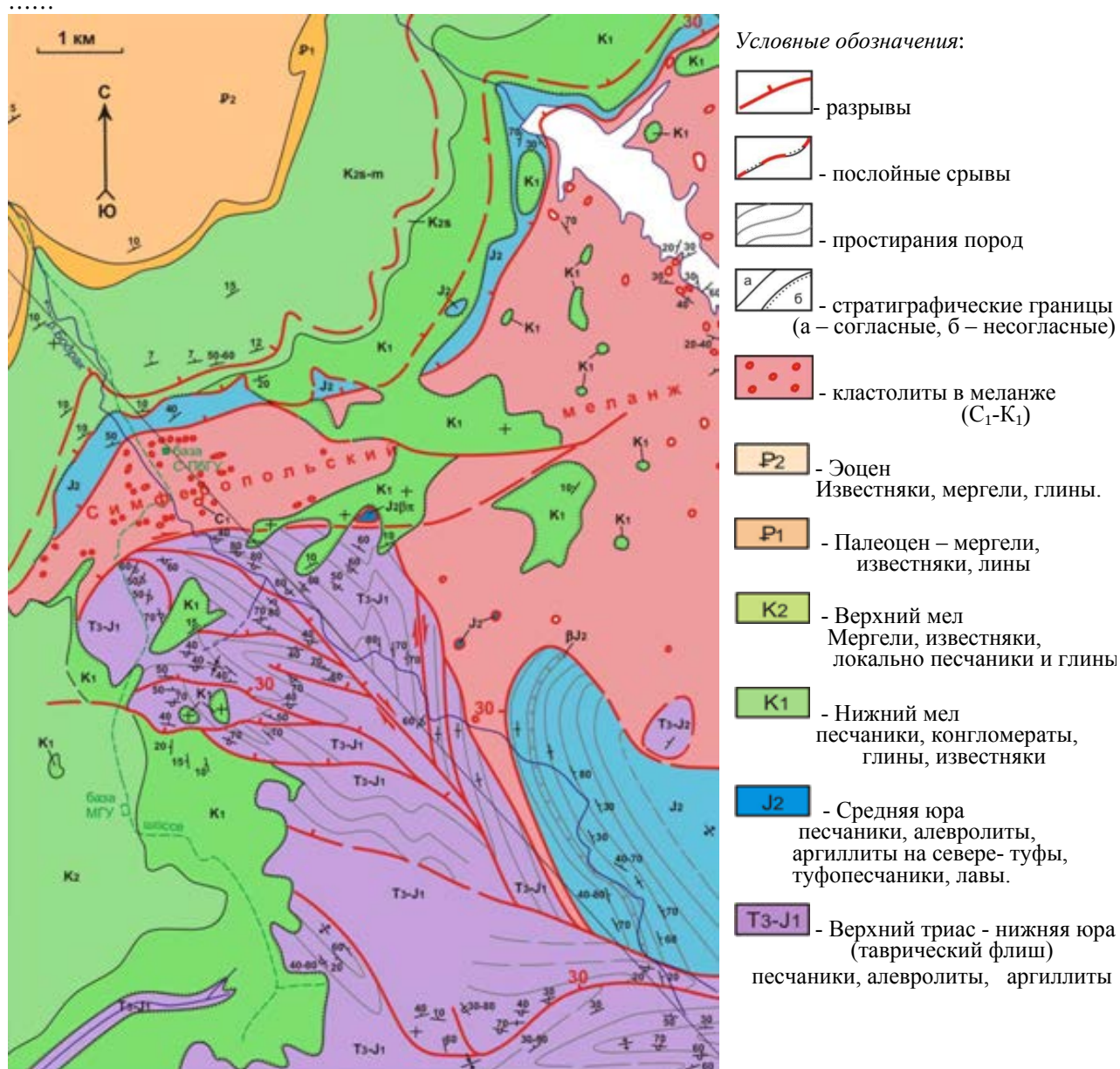


Рис. 10. Геологическая карта бассейна р. Бодрак (В.В. Юдин, 2001) [143]

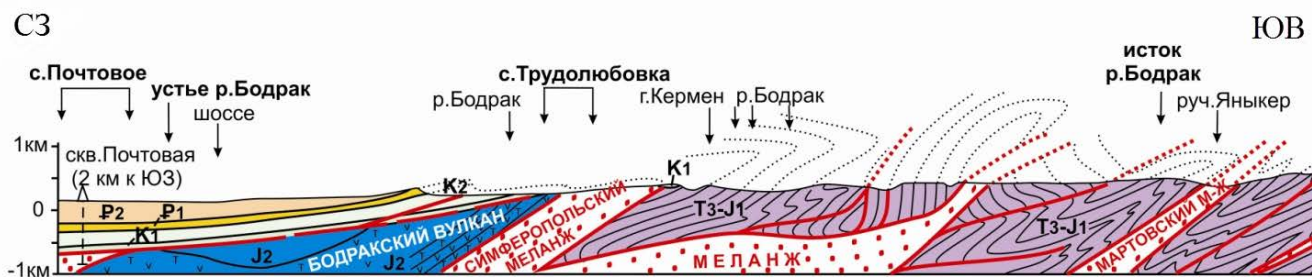


Рис. 11. Геологический разрез бассейна р. Бодрак (В.В. Юдин, 2011)

В толще алевролитов иногда встречаются сидеритовые конкреции. Мощность таврической серии более 1500 м. На территории Качинского поднятия таврическая серия расчленена на три свиты - нижнетаврическую (T_3k-n), ченкскую (J_1s-p_1) и верхнетаврическую ($J_1p_2-J_2a_1$) [114].

Эскиординская серия (T_3-J_1es)

Эскиординская серия горного Крыма, выделенная А.С. Моисеевым как самостоятельная стратиграфическая единица [98], имеет сложное строение.

Эскиординская серия занимает площадь (в плане имеющую форму клина) между Колхозным и Джидаирским оврагами, территорию севернее разлома, проходящего от северного склона г. Кременной через устье Воронежского оврага до Аммонитового (плато Патиль, Джидаирский овраг, русло р. Бодрак, левый борт Ленинградского оврага). На севере и северо-западе эскиординская серия отделена тектоническим контактом от флишеидных отложений нижнетаврической свиты (T_3k-n), на юго-востоке – от флишевых отложений верхнетаврической свиты ($J_1p_2-J_2a_1$). В.В. Юдин относит данный комплекс к Симферопольскому меланжу [142, 146].

Эскиординская серия, отличающаяся резкой фациальной изменчивостью, представлена терригенно-глинистыми породами - флишеподобным чередованием песчаников и глин, глинистыми отложениями. Породы сильно рассланцованы. В долине реки Бодрак в глинистом матриксе содержатся обломки нижнеюрских органогенно-обломочных известняков. Породы эскиординской серии прорваны многочисленными дайкообразными гипабиссальными телами основного состава.

В составе эскиординской серии выделяются три толщи [21]: мендерская (глинистая, с редкими прослоями алевролитов), джидаирская (глинистая), кичикская (песчано-глинистая алевролитовая).

По сравнению с таврической, эскиординская серия более грубозерниста, в ней отсутствует правильная ритмичность, она является возрастным аналогом таврической серии. Отложения эскиординской и таврической серий формировались в разных палеофациальных обстановках.

Карадагская серия (J_2b)

Вулканогенно-осадочные отложения карадагской серии обнажаются в районе д. Трудолюбовки (левый борт р. Бодрак), падая на северо-запад под углами 30-70° (рис. 12). Центральная часть деревни располагается непосредственно на вулканогенно-осадочных породах, представленных туфами, туфопесчаниками, туфоаргиллитами, аргиллитами с прослоями базальтовых лав. Карадагская серия, представленная здесь мощной толщей

(более 500 м) осадочных, эффузивно-осадочных и эффузивных пород, с юга граничит по разлому с флишоидами эскиординской серии и перекрывается с размывом и угловым несогласием терригенно-карбонатными породами нижнего мела.

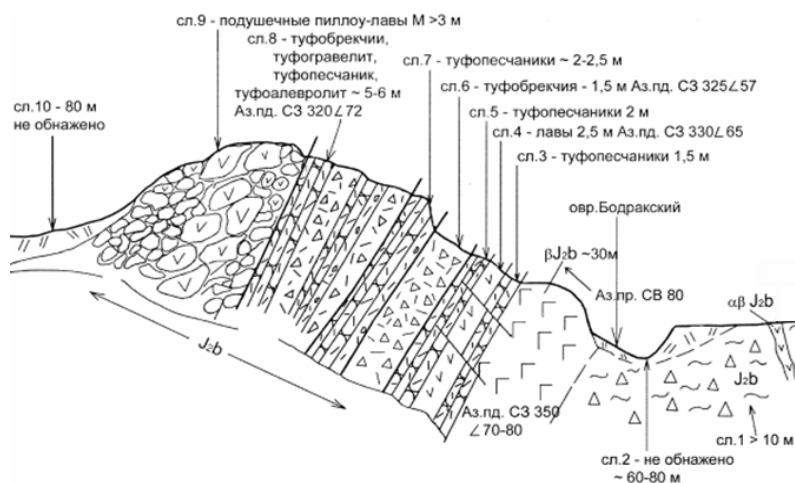


Рис. 12. Разрез вулканогенно-осадочных пород, центр д. Трудолюбовки [105]

Нижняя (осадочная) толща карадагской серии сложена среднезернистыми аргиллитовыми брекчиями серо-зеленого цвета. В осадочных прослоях встречаются остатки аммонитов. В зоне тектонического контакта с породами эскиординской серии встречаются дайки основного состава. В верхней (вулканогенной) толще карадагской серии выделяют три пачки. Нижняя - представляет ритмичное переслаивание лав с шаровидной отдельностью, зеленовато-серых туфопесчаников и туфоаргиллитов. Средняя пачка представлена комковатыми, неслоистыми туфами. Третья пачка сложена массивными лавами (оливин-пироксеновый порфирит) [104].

Меловая система (К)

Север-северо-западную часть бассейна р. Бодрак занимают отложения мела и палеогена (Куэстовая моноклираль) суммарной мощностью около 800 м [144], они наклонены на север и северо-запад под углами 7-12°. Мел-палеогеновые отложения залегают с угловым несогласием на триас-среднеюрском складчатом основании.

Меловые отложения бронируют вершины плато и склоны хребтов южного продольного межгрядового понижения. На некоторых участках породы мелового возраста представлены в виде останцов (плато г. Патиль, г. Шелудивая, г. Длинная, Большой и Малый Кермены). Нижнемеловые породы преимущественно терригенного состава, верхнемеловые – карбонатного.

Нижний отдел ($K_1v-h_2^1$, $K_1h_2^2-br_2^1$, $K_1br_2^2-a_2$, $K_1al_3^1$, $K_1al_3^2$)

Среди нижнемеловых пород преобладают песчаники, алевролиты, органогенно-обломочные известняки. Известняки валанжинского и готеривского ярусов мощностью до 17 м залегают с резким угловым и стратиграфическим несогласием на породах нижнего структурного этажа. Это светло-желтые органогенно-обломочные известняки со значительной долей терригенной примеси в нижней части толщи и уплотненными ближе к кровле (рис. 13); заметны карстовые явления (каверны, пещерки). Отложения бронируют плато Патиль, г. Шелудивая, г. Длинная, г. Сель-Бухра, выходят на восточном склоне г. Кременной (розовое поле), в виде узкой полосы на южном склоне г. Мендер, на вершинах гор Большой и Малый Кермены, южном склоне г. Кизил-Чигир.

В основании верхнемеловых пород располагается маркирующий горизонт среднезернистых глауконитовых песчаников верхнего альба – нижнего сеномана (K_1al_3 - K_2s_1) серо-зеленого цвета мощностью до 8 м, залегающий трансгрессивно на породах вулканогенно-осадочной толщи или готеривских известняках. На глауконитовых песчаниках залегают мергелистые известняки сеноманского яруса верхнего мела.



Рис. 13. Органогенный известняк, $K_1v-h_2^1$

Верхний отдел (K_2s-t_1 , K_2t_2-k , K_2st-m)

Отложения верхнего отдела меловой системы, представленные карбонатными породами мощностью до 500 м, широко распространены на территории.

Сеноманские светло-серые глинистые мергели (K_2s) имеют мощность около 60 м, отличаются хорошей плитчатой отдельностью и небольшим количеством глинистой составляющей, которая уменьшается выше по разрезу. Далее они переходят в мергели нижнего турона мощностью до 50 м, а еще выше залегают белые известняки верхнего турона, переходящие в сходные с ними коньякские известняки (K_2t_2-k).

Коньяк-сантон-кампанские отложения представлены карбонатными породами мощностью более 100 м: массивные плитчатые серо-белые известняки с песчано-глинистыми прослоями (южные склоны Баклинской и Корабельной куэст). Песчанистые известняки постепенно переходят в известковистые песчаники (K_2m) с ячеистым

выветриванием – серо-желтые мелкозернистые песчаники с карбонатным цементом и стяжениями глинистого материала (обрывы и склоны Баклинской и Корабельной куэст).

Меловая толща песчанистых и глинистых мергелей, а также глин и песчаников (сеноман-маастрихт) оконтуривают Внутреннюю гряду вдоль всего подножья юго-восточного склона. Из-за высокого содержания глинистого материала мергели считаются слабо карстующимися, однако в них имеются субвертикальные карстовые каналы и проницаемые зоны закарстованной тектонической трещиноватости. Отдельные горизонты верхнемеловых отложений интенсивно трещиноваты.

Кайнозойская эратема

Палеогеновая система (P_{1d-m} , P_{1t} , P_{2i1} , P_{2i2-l})

На отложениях меловой системы несогласно залегают терригенно-карбонатные отложения палеогена, которые входят в состав верхнего структурного этажа, формируют куэстовый рельеф Второй и Третьей гряд.

Мшанковые (датские) и нуммулитовые (лютетские) известняки кавернозны, что предопределяет развитие в них подземных вод. Известняки Предгорной гряды отличаются средней степенью карстуемости (наличие большого количества глинистого нерастворимого остатка, кольматирующие трещины и т.п.), значительная часть карстопоявлений в пределах области является реликтовыми гипогенными образованиями [76].

Нижний палеоген (палеоцен) (P_{1d-m} , P_{1t})

В пределах Внутренней гряды датские известняки протягиваются достаточно узкой полосой вдоль куэсты северного склона Внутренней гряды Крымских гор, бронируя ее пологонаклонные поверхности.

На меловой толще практически везде со следами размыва залегают прочные криноидно-мшанковые и фораминиферовые известняки палеогена (P_{1d-m}) мощностью около 10 м (с прослоями глауконитовых песчаников в основании), которые трансгрессивно перекрываются отложениями танетского яруса (P_{1t}), представленные плотными серыми глинистыми мергелями мощностью около 30 м. В основании – (поверхность размыва Hard ground) следы размыва мшанково-криноидных известняков, многочисленные органические остатки брахиопод, двустворок, гастропод. Толщи этих отложений протягиваются полосой с юго-запада на северо-восток, слагая нижний уступ куэст (горы и плато Чуфут-Кале, Беш-Кош, Тепе-Кермен, Яных-Сырт и другие). Породы танетского яруса, представленные в основном мергелями, протягиваются полосой с юго-запада на северо-восток, слагая нижний уступ куэст вместе с известняками датско-монтского яруса.

Средний палеоген (эоцен) (P_{2i1} , P_{2i2-l}) залегает на танетских известняках со стратиграфическим несогласием. Отложения ипрских глин и лютетских известняков вмещают большое количество обломков фауны. Серо-зеленые глауконитовые глины ипрского яруса (P_{2i}), с размывом залегающие на нижележащей толще серых мергелей, протягиваются с северо-востока на юго-запад и имеют мощность около 30 м.

Органогенные нуммулитовые известняки по возрасту соответствующие лютетскому ярусу с согласным переходом перекрывают ипрские глины. Известняки бронируют северные склоны куэстовой гряды, они прекрасно обнажены; в средней части можно видеть интересные формы выветривания в виде причудливых столбов высотой 10-20 м. Мощность отложений незначительно уменьшается с юго-запада на восток, и в среднем составляя около 10 м. Данная толща - один из наиболее выдержанных горизонтов палеогеновых отложений в Крыму.

Известняки нетрещиноваты и слабозакарстованы, крепкие, мелкозернистые, массивные (имеют высокую денудационную стойкость), органогенно-обломочные, белые на сколе, в нижней части с прослоями глинистых известняков и глинистых мергелей (разрабатываются как строительный материал), основная фауна – нуммулиты.

Четвертичная система (Q_{II} , Q_{III} , Q_{IV})

Основой для стратиграфии четвертичных отложений Крыма служат морские террасы и сопоставление их с речными террасами и делювиально-пролювиальными уровнями, которые хорошо развиты почти по всем речным долинам Горного Крыма [100]. Все террасы сложены окатанным аллювиальным материалом (валунным в верховьях, галечниковым в средней части, мелкогалечниковым в низовьях). Наиболее широкая - первая надпойменная (садовая) терраса, остальные сохранились от размыва только местами в виде плоских останцовых гряд.

Четвертичная система на изучаемой территории представлена отложениями среднего и верхнего плейстоцена и современными голоценовыми отложениями, к ним относятся *аллювиальные, пролювиальные, делювиально-пролювиальные, делювиальные, элювиальные, коллювиальные отложения* (мощностью 4-6 м).

Аллювиальные отложения формируют речные долины р. Бодрак и оврагов (Ленинградского, Московского, Мангушского, Баклинского), на более древних и высоких террасах они представлены щебнем в суглинисто-супесчаном матриксе, на более молодых террасах и в пойме – средне и хорошо окатанным валунным материалом.

Состав обломков и гальки в аллювиальных отложениях зависит от пород, залегающих в русле, например в юго-восточной части бассейна р. Бодрак (до Мангушского оврага) аллювий представлен однородным составом обломочных пород флишевой толщи с хорошо окатанными обломками песчаников и аргиллитов с сидеритовыми конкрециями или галечников интрузивных пород, вниз по течению – аллювий слагают смешанные неотсортированные обломки аргиллитов, песчаников и органогенно-обломочных известняков с кремнистыми конкрециями.

Проллювиальные отложения (временных водных потоков) связаны с устьями крупных оврагов (Ленинградским, Московским, Мангушским, Яман, Длинным, Карьерным, Керменским, Джидаирским) и представлены конусами выноса, сложенные мелким щебнем из пород водосбора и суглинками. Мощность отложений до 8 метров.

Делювиально-проллювиальные отложения заполняют долины крупных оврагов (Ленинградского, Московского, Керменного, Мангушского и др.) и реки Бодрак, а также слагают террасы и склоны гор (15-20°) - Кизил-Чигир, Большой и Малый Кермен и др. Накопления представлены мелко- и среднегалечными угловатоокатанными обломками песчаников, известняков, мергелей в известковистом или аргиллитовом матриксе.

Делювиальными отложениями, образованными в результате плоскостного смыва рыхлых продуктов выветривания горных пород дождевыми потоками, сложены пологие (менее 13°) склоны р. Бодрак и долины оврагов. Делювиальные образования обнаруживаются на склонах гор Большой и Малый Кермены, Лесистая, Белая, Кизил-Чигир, в бортах многочисленных оврагов (Московский, Мангушский, Баклинский и др.). Мощность отложений более 6 метров.

Элювиальные отложения образовались при разрушении верхнего слоя коренных пород на уплощенных поверхностях водоразделов, на плоских вершинах гор (Патиль, Шелудивая, Малый и Большой Кермены) и на куэстовых грядках. Элювиальные отложения представлены грубым щебнистым материалом кор выветривания.

Коллювиальные обвальнo-осыпные отложения формируются (под действием силы тяжести) на выветрелых обнаженных склонах куэстовых гряд (Баклинской и Корабельной), склонах гор (Патиль, Лесистой, Кизил-Чегир, Белой, Большого и Малого Керменов и других) и в оврагах. Отложения (остроугольные несортированные обломки) представлены суглинками с мелким щебнем из различных пород разных возрастов - флишеидных, карбонатных, глинистых.

Интрузивные образования в пределах бассейна р. Бодрак представлены многочисленными малыми интрузиями преимущественно основного состава - дайками, силами, штоками (например, силл Короновского, Первомайский шток и др.).

3.2. Общие гидрогеологические условия Крымского полуострова

3.2.1. Гидрогеологическое районирование

Гидрогеологические особенности различных областей Крыма определяются геологическим строением и тектоникой. На основе структурно-гидрогеологического принципа (с учетом условий питания и разгрузки подземных вод) осуществляется гидрогеологическое районирование территорий, поскольку рельеф, тектоническое строение и расположение бассейнов подземных вод тесно взаимосвязаны.

Большой вклад в разработку вопросов региональной гидрогеологии и гидрогеологического районирования на начальном этапе сделали такие ученые как И.К. Зайцев, Н.И. Толстихин, Г.Н. Каменский, А.М. Овчинников. Первые публикации по гидрогеологическому районированию СССР (на тектонической основе) представлены М.М. Васильевским. Одна из первых схем гидрогеологического районирования Крымского полуострова выполнена Е.А. Ришес и М.В. Чуриновым в 1959 г., когда на основе геолого-структурного принципа были выделены несколько гидрогеологических районов [4, 22].

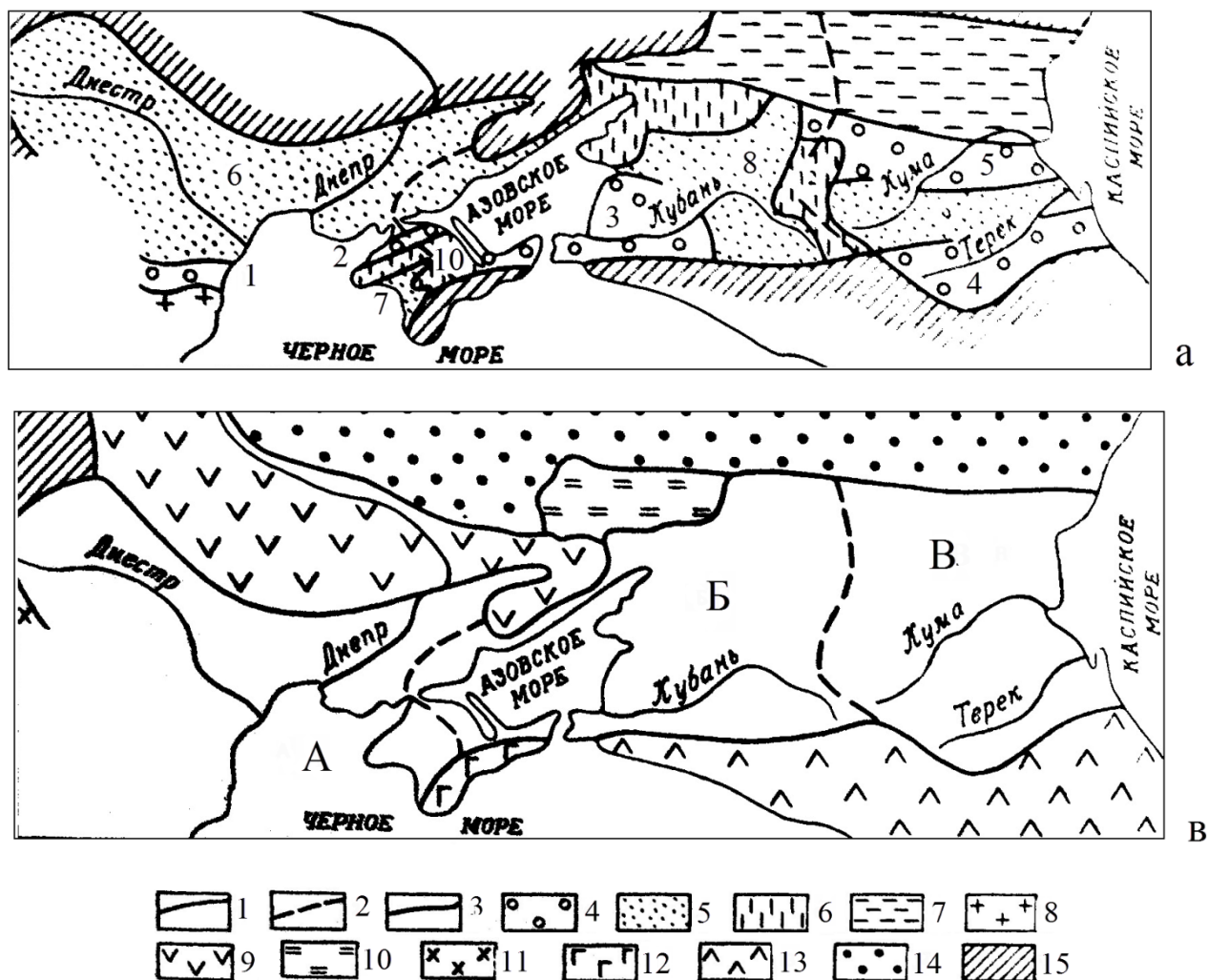
В дальнейшем схема районирования претерпевала некоторые изменения. Уже в т. 8 «Гидрогеологии СССР», вышедшим в 1970 г. граница между артезианскими бассейнами платформы была существенно изменена.

В 1987 г. вышла фундаментальная монография В.А. Кирюхина и Н.И. Толстихина «Региональная гидрогеология», в которой освещены региональные закономерности формирования и распространения подземных вод, изложены принципы и методы гидрогеологического картирования и районирования [74].

На территории Крыма сочленяются две крупные гидрогеологические структуры, выходящие за пределы полуострова: Каспийско-Черноморская артезианская область (в которую входят Причерноморский и Приазовский артезианские бассейны первого порядка) и Крымская мезозойско-кайнозойская гидрогеологическая складчатая область (рис. 14).

Граница между Причерноморским и Приазовским артезианскими бассейнами проведена по водоразделу, от которого подземные воды неогенового водоносного горизонта перемещаются к Азовскому и Черному морям.

Предгорные гряды входят в состав краевых частей Альминского и Индольского (Белогорского) артезианских бассейнов II порядка и являются областями питания водоносных горизонтов южных крыльев этих бассейнов. Существует тесная гидрогеологическая связь между структурами Горного и Равнинного Крыма.



- 1 – границы АО; 2 – границы АБ; 3 – границы гидрогеологических структур;
 4 – прогибы (1. Преддобруджинский, 2. Каркинитский, 3. Азово-Кубанский, 4. Терско-Кумский, 5. В. Манычский);
 5 – впадины (6. Северо-Причерноморская, 7. Альминская, 8. Восточно-Кубанская, 9. Терско-Кумская);
 6 – своды (10. Крымский, 11. Ростовский, 12. Ставропольский);
 7 – кряж Карпинского; 8 – Добужинский массив; 9 – Украинская СО; 10 – Донецкая СО; 11 – Карпатская СО; 12 – Крымская СО; 13 – Кавказская СО; 14 – Прикаспийский АБ; 15 – Львовский АБ.
 А – Северо-Причерноморский АБ; Б – Приазовский АБ; В – Среднекаспийский АБ.

Рис. 14. Структурно-геологическое (а) и гидрогеологическое (в) районирование Каспийско-Черноморской артезианской области [74]

3.2.2. Гидрогеологическая характеристика территории бассейна р. Бодрак

Территория крымского предгорья по своим гидрогеологическим условиям занимает промежуточное положение между гидрогеологическими областями трещинно-карстовых вод Главной гряды Крымских гор и артезианскими бассейнами Степного Крыма. Терригенно-карбонатные породы (мелового и палеогенового возраста), слагающие Внутреннюю гряду, относятся к области питания Альминского артезианского бассейна; р. Бодрак, пересекая отложения мелового возраста (Внутренняя гряда) и неогенового возраста (Внешняя гряда), питает основные водоносные горизонты Альминского артезианского бассейна, теряя значительное количество своих вод на инфильтрацию и инфильтрацию.

На изучаемой территории получили развитие грунтовые воды в породах разного возраста и литологического состава, которые образуют не выдержанные по площади пластовые горизонты или зоны трещинно-грунтовых вод в трещиноватых карбонатных породах мелового, палеогенового и неогенового возраста и в корах выветривания коренных пород. Трещины выветривания образуются при нагревании и охлаждении горных пород под влиянием сезонных и суточных колебаний температуры воздуха.

Практическое значение имеют грунтовые воды четвертичных отложений аллювия реки Бодрак и зон экзогенной трещиноватости вулканогенно-осадочной толщи (J_2b). В южной части бассейна, где широко развиты флишевые отложения таврической и эскиординской серий (T_3-J_1), подземные воды почти полностью отсутствуют. Колодцы и скважины на изучаемой территории в большинстве своем приурочены к аллювиальным отложениям реки Бодрак и пролювиальным отложениям водотоков, а также к коре выветривания вулканогенно-осадочных пород байосского яруса.

Питание грунтовых вод в бассейне реки Бодрак осуществляется по всей площади бассейна, главным образом, за счет атмосферных осадков (около 600 мм в год), конденсации влаги в зоне аэрации, поверхностного стока и отчасти за счет транзитных подземных вод. Характер распределения выпадающих атмосферных осадков и температуры воздуха определяют естественный режим грунтовых вод района.

В зимне-осеннее время, когда температура воздуха сравнительно небольшая, происходит интенсивное питание подземных вод за счет инфильтрации атмосферных осадков. Грунтовые воды могут выходить на поверхность, образуя нисходящие источники.

Мелкосопочный рельеф таврических пород способствует интенсивному поверхностному стоку - во время дождей и снеготаяния вода быстро стекает по склонам гор

в естественные понижения, интенсивно размывая флишевые отложения, однако практически не просачивается вглубь.

Для водоносности отложений таврической, эскиординской и байосской серий нижнего структурного этажа определяющее значение имеют зоны экзогенной или эндогенной трещиноватости и тектонических нарушений (где могут формироваться зоны локальных обводнений). Например, зона экзогенной трещиноватости вулканогенно-осадочной толщи (с трещиноватыми песчаниками и туфами) в центре д. Трудюлюбовка служит источником водоснабжения. Воды, связанные с корой выветривания сланцев таврической серии, выходят на поверхность в виде маломощных родников или вскрываются колодцами с очень низким дебитом.

Трещинные безнапорные воды экзогенной трещиноватости, приуроченные к верхней части разреза, широко развиты в районе исследования. С глубиной экзогенная трещиноватость затухает, что характеризуется снижением проницаемости пород от 0,5 м/с (в верхней части разреза) до 10^{-3} м/с и меньше (в нижней части разреза). Вследствие этого меняются фильтрационные и емкостные свойства пород одного состава и возраста.

Часто коллектора образуют единую гидравлическую систему. Разгрузка формируется в оврагах и межгорных впадинах как открыто (в виде источников и родников), так и “скрыто” в гидрографическую сеть. Далее эти воды попадают в р. Бодрак, которая является естественной областью разгрузки трещинных и поровых вод нашей долины.

Практически все подземные воды территории легко дренируются, так как находятся в зоне активного водообмена. На характер питания и разгрузки подземных вод влияют: рельеф, тектоника, литология вмещающих пород, мощность и состав рыхлых отложений перекрывающие трещинные породы, промежуточное положение территории. Движение вод осуществляется в направлении уклона поверхности под воздействием силы тяжести.

Куэстовый рельеф меловых пород (Корабельная, Баклинская куэсты) и плоские вершины гор способствует задерживанию атмосферной влаги, которая, просачиваясь по трещинам и карстовым пустотам, формирует сток.

В формировании химического состава грунтовых вод большое значение имеет медленное выщелачивание малорастворимых солей, возникающее при выветривании горных пород. В результате происходит формирование гидрокарбонатных вод: гидрокарбонатно-кальциевых и гидрокарбонатно-магниевых. В силу малой растворимости данных солей практически все подземные воды бассейна реки Бодрак (исключая аномальную область) имеют невысокую минерализацию – около 1 г/л.

На территории бассейна р. Бодрак выделяются следующие водоносные и водоупорные горизонты [51]:

Четвертичный водоносный горизонт (Q);
Среднеэоценовый водоносный горизонт (Pg_{2l});
 Верхнепалеоценово-нижнеэоценовый водоупорный горизонт;
Датско-инкерманский водоносный комплекс (P_{1d-m});
 Верхнесантонско-верхнемаастрихтский преимущественный водоупор;
Верхнетуронско-коньякский водоносный горизонт (K_{2t2}-K_{2k});
 Нижнесеноманско-нижнетуронский водоупорный горизонт;
Верхнеальбско-нижнесеноманский водоносный горизонт (K_{1al3}- K_{2s1});
 Верхнеальбский водоупорный горизонт;
 Верхнебаремско-аптский водоупорный горизонт;
Валанжин-нижнебарремский водоносный горизонт (K_{1v}-h₂¹, K_{1h}₂²-br₂¹);
Водоносная зона вулканогенно-осадочной толщи (J_{2b});
 Байосский региональный водоупорный горизонт;
 Верхнетриасово-нижнеюрский региональный водоупорный горизонт.

Четвертичный водоносный горизонт (Q) в районе исследования приурочен, главным образом, к аллювиальным и делювиально-пролювиальным голоценовым отложениям - прослоям песка, гальки, валунно-галечниковым и гравийным накоплениям, супесчано-суглинистым, суглинисто-щебенистым образованиям.

Подземные воды развиты в аллювиальных образованиях поймы и первой надпойменной террасы реки Бодрак, в аллювиально-пролювиальных отложениях оврагов: Ленинградский (Шара), Московский (Мендер), Мангушский, в делювиально-пролювиальных отложениях балок и оврагов: Колхозный, Сухой Лог (Чак-Махлы), Аммонитовый, Керменский, Карьерный, Мангушский, Баклинский (Токма) и др.

Питание водоносного горизонта происходит за счет атмосферных осадков. Разгрузка осуществляется в реки и ручьи, а также в нижележащие водоносные горизонты. Воды четвертичного водоносного горизонта безнапорные, имеют очень хорошую гидравлическую связь с поверхностными водами. Так как речная система поставяет воду спорадически, режим грунтовых вод аллювия имеет ярко выраженный сезонный характер – обильность в паводок и скудность в межень, в связи с этим уровень аллювиальных вод сезонно колеблется. В летнюю межень уровни грунтовых вод аллювия находятся на глубинах примерно 1 – 2 м от поверхности земли.

Подземные воды аллювиально-пролювиальных отложениях Московского оврага образуют месторождение пресных подземных вод «Вербочки», на месте которого оборудован водозабор, обеспечивающий питьевыми водами хорошего качества жителей д. Прохладное и базу МГУ (около 300 м³/сут.). В локализации выхода вод не последнюю

роль играет Бодракский разлом. Вода пресная жесткая гидрокарбонатная кальциевая. Из микрокомпонентов, концентрации бария нередко превышают ПДК - 0,57–0,85 мг/л:

$$M(0,5-0,6) \frac{HCO_3(74-91)}{Ca(80-82)} pH(7,0-7,5).$$

В делювиальных чехлах, покрывающих склоны могут циркулировать грунтовые воды, имеющие малый дебит в силу наклонного залегания делювия. Делювиальные отложения часто маскируют выходы пластовых вод.

По составу воды четвертичного водоносного горизонта гидрокарбонатные или сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые жесткие или (чаще) очень жесткие (до 11,6 мг-экв./л), по минерализации пресные или (чаще) солоноватые.

Химический состав воды из колодцев, заложенных в аллювии р. Бодрак:

$$M(0,9-1,3) \frac{HCO_3(56-75) SO_4(12-33) Cl(8-14)}{Ca(42-53) Mg(23-43) Na(13-21)} pH(6-8);$$

Химический состав воды из колодцев пролювиальных отложений овра. Колхозный:

$$M(0,8-1,0) \frac{HCO_3(49-78) SO_4(17-36) Cl(5-10)}{Ca(49-59) Mg(23-35) Na(15-16)} pH(6-8);$$

Несмотря на пересыхание русла р. Бодрак в засушливое время, подрусловой аллювиальный поток в пойме реки сохраняется и остается источником водоснабжения. В нижнем течении реки грунтовые аллювиальные воды дренируются трещиноватыми породами мела. На территории имеются родники с сезонно меняющимся дебитом, связанные с аллювиальными отложениями (например, р. Постоялый двор, первая надпойменная терраса).

$$M(0,8-0,9) \frac{HCO_3(80-93) SO_4(1-22) Cl(6-7)}{Ca(43-50) Mg(36-41) Na(12-14)} pH(7-7,5).$$

Воды четвертичного водоносного горизонта широко используются для водоснабжения пос. Скалистое, д. Трудолюбовки, пос. Прохладное.

Помимо атмосферных осадков большую роль в питании данного горизонта играют паводковые воды, в паводок пополняющие подрусловые потоки и проникающие (путем фильтрации) в разновозрастные толщи прилегающих пород.

Среднеэоценовый (лютетский) водоносный горизонт (Pg₂lt) распространен на севере и северо-западе изучаемой территории (северный склон Второй гряды). Горизонт хорошо выдержан по площади. Водовмещающие отложения представлены органическими нуммулитовыми известняками, неравномерно сцементированными, иногда трещиноватыми,

мощностью около 20 – 40 м. Коллекторами выступают поры, экзогенные трещины и карстовые полости. Известняки несколько закарстованны как с поверхности, так и внутри толщи, образуя небольшие карстовые воронки, пещерки и т.д. Воды безнапорные, однако, при погружении известняков под мергели верхнего эоцена трещиноватость их резко затухает, снижается обводненность отложений и воды приобретают напор.

Питание водоносного горизонта происходит за счет атмосферных осадков. Снизу среднеэоценовый горизонт подстилается верхнепалеоэоценово-нижнеэоценовым водоупорным горизонтом (ипрские глины и мергели таннета). Разгрузка осуществляется вместе с подземным стоком и в нижележащие горизонты.

Нуммулитовые известняки содержат грунтовые воды хорошего питьевого качества (многочисленные колодцы, родники). Дебит родников невелик, до 1,5 л/с. Колодцы не пересыхают даже в самые засушливые годы. Воды этого водоносного горизонта используются для водоснабжения пос. Скалистое, старой части г. Бахчисарая.

Химический состав безнапорных вод среднего эоцена гидрокарбонатно-кальциевый; вода жесткая пресная щелочная с минерализацией 0,6 – 0,7 г/л:

$$M_{0,6-0,7} \frac{HCO_3(62-70)SO_4(18-22)Cl(13-16)}{Ca(60-62)Mg(19-24)Na(16-17)} pH7$$

Датско-инкерманский водоносный комплекс (P_{1d-m}) общей мощностью до 40 – 50 м протягивается узкой полосой вдоль куэсты северного склона Внутренней гряды Крымских гор. Из мел-неогеновых отложений верхнего структурного комплекса наибольшей водообильностью отличаются именно датские кавернозные известняки, составляющие единую толщу с известняками инкерманского яруса палеоэоцена.

Питание водоносного горизонта осуществляется, главным образом, за счет атмосферных осадков. Областями питания являются северные склоны Внутренней гряды. К северо-западу от области питания датско-инкерманский водоносный комплекс резко погружается. Перекрывающая (защищающая) эти датские известняки толща (примерно, 40–метровой мощности) плотных мергелей танетского яруса вместе с глинами ипрского яруса палеогена образуют верхний водоупорный слой.

Выходящие на поверхность известняки могут быть закарстованы. Современный карст в области развит ограниченно, значительная часть карстопроявлений является реликтовыми гипогенными образованиями [76]. Карстовые полости (воронки, кары, каверны, поноры) являются важным фактором для формирования подземных вод.

Степень обводненности датско-инкерманского водоносного комплекса неравномерная. Особую роль в формировании подземных вод играют зоны тектонических

нарушений и участки повышенной трещиноватости известняков, поэтому единое зеркало грунтовых вод отсутствует.

Воды датско-инкерманского водоносного комплекса щелочные пресные (минерализация < 1 г/л), в химическом составе из анионов преобладают гидрокарбонаты, из катионов – кальций; температура воды около 15-20°C. В зонах погружения минерализация возрастает. Воды этого горизонта отличаются хорошими питьевыми качествами, содержания ряда микрокомпонентов не превышают ПДК. Вдоль обрыва куэстовой гряды вблизи областей питания встречаются выходы нисходящих источников гидрокарбонатно-кальциевого состава с дебитом 0,5 - 2,5 л/сек. В межень некоторые источники пересыхают.

$$M_{0,6-0,7} \frac{HCO_3(83-90) Cl(5-11) SO_4(1-12)}{Ca(82-87) Mg(7-8) Na(5-8)} pH7$$

Верхнетуронско-коньякский водоносный горизонт ($K_2t_2-K_2cn$) связан с водопроницаемыми участками в преимущественно водоупорных верхнемеловых отложениях (это – плотные мергели, плотные глинистые известняки, глины), которые выходят на поверхность в пределах Внутренней гряды. Отдельные горизонты могут быть водоносны либо в силу своей экзогенной или тектонической трещиноватости, либо благодаря прослоям песчаников, конгломератов, известняков. Например, у подножия древнего города Баклы существует сезонно пересыхающий источник:

$$M_{0,5-0,7} \frac{HCO_3(71-76) SO_4(17-23)}{Ca(73-75) Mg(6-22) Na(3-22)} pH7$$

Верхнеальбско-нижнесеноманский водоносный горизонт ($K_1al_3- K_2s_1$) приурочен к песчанистым известнякам, известковистым песчаникам и песчаникам (выходит на поверхность в виде узкой полосы северо-восточного простирания, протягивающейся с юго-востока на северо-запад). Мощность горизонта небольшая (толща глауконитовых песчаников на полигоне СПбГУ около 8 м). Снизу горизонт подстилается водоупорными отложениями нижнего мела и юры-триаса. Питание водоносного горизонта происходит за счет атмосферных осадков. Разгрузка осуществляется в овражную сеть, а также в нижележащие водоносные горизонты. Воды этого водоносного горизонта используются для водоснабжения, по составу они гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией 0,4-1,0 г/л, например, источник на южном склоне г. Сель-Бухра:

$$M_{0,4-0,5} \frac{HCO_3(83-88) Cl5 SO_45}{Ca(82-89) Mg5 Na5} pH8, T8^\circ C$$

Валанжин-нижнебарремский водоносный горизонт ($K_1v-h_2^1, K_1h_2^2-br_2^1$) имеет большое практическое значение на территории бассейна р. Бодрак. Подземные воды

связаны с песчано-глинистыми отложениями, органогенно-обломочными известняками, линзами песчаников и валунами, желто-серыми плотными и рыхлыми песчаниками. Коллекторами служат трещины и поры. Органогенно-обломочные известняки характеризуются крупной пористостью, в них хорошо видны карстовые полости (рис. 13). Поскольку органогенно-обломочные известняки бронируют верхушки ряда столовых гор в бассейне р. Бодрак, образуя обширные плато (горы Длинная, Шелудивая, Б. и М. Кермены, плато Патиль), сам рельеф способствует инфильтрации атмосферных осадков, под известняками залегают песчаники, в поровом пространстве которых циркулируют подземные воды.

Питание водоносного горизонта происходит за счет атмосферных осадков и конденсации. Воды данного горизонта дают начало многочисленным источникам с достаточно устойчивым дебитом. Разгрузка осуществляется в овражную сеть, а также в нижележащие водоносные горизонты. Водоупром выступают глины готеривского яруса и флишевые отложения верхнего триаса - нижней юры, к северу водовмещающие отложения погружаются под глины апта-альба и мергели верхнего мела. Мощность водоносных горизонта варьирует от нескольких метров до 80 м.

На территории бассейна р. Бодрак существует несколько никогда не пересыхающих источников в карстующихся карбонатных породах: родник Домик лесника, Джидайрский, родник Афениз.

Нередки случаи, когда воды меловых отложений играют ключевую роль в существовании источников, выходящих на поверхность у подножий склонов, которые лишь в верхних частях сложены карбонатными отложениями мелового возраста или их продуктами разрушения. Например, родник на г. Патиль разгружается по трещиноватости флишевых пород таврической серии, однако формирование вод источника связано с известняками, бронирующими плоскую вершину г. Патиль, и подстилающими их известковистыми песчаниками.

Несмотря на то, что карстовые процессы в меловых отложениях имеют небольшие масштабы, тем не менее, они играют важнейшую роль в формировании подземных вод изучаемой территории. Как правило, с меловыми отложениями связаны трещинно-карстовые грунтовые воды зоны активного водообмена. Химический состав формируется под влиянием состава атмосферных осадков и вмещающих пород.

Подземные воды источников валанжин-нижнебарремского водоносного горизонта отличаются хорошими питьевыми качествами и используются для водоснабжения, по

составу они гидрокарбонатно-кальциевые пресные щелочные от умеренно-жестких до жестких. Дебиты в среднем около 10 л/мин.:

$$M(0,6 - 0,8) \frac{HCO_3(81-89) Cl(7-14) SO_4(2-4)}{Ca(79-85) Na(7-13) Mg(5-6)} pH(7-7,5)$$

Водоносная зона вулканогенно-осадочной толщи (J_{2b}) приурочена к коре выветривания пород вулканогенно-осадочной толщи карадагской серии (зона развития экзогенной трещиноватости вследствие дневных, сезонных и вековых перепадов температур), сложенной туфами, туфопесчаниками, туфоаргиллитами, аргиллитами (рис. 12). Мощность водоносной зоны около 20 - 30 м.

Подземные воды циркулируют в выветрелых сланцах, а также в трещиноватых песчаниках и туфах. В центре д. Трудолюбовки практически в каждом доме имеется колодец или скважина (глубины - 10-20 метров); трещинно-грунтовые воды вулканогенно-осадочной толщи используются местными жителями для питья и хозяйственных нужд. Однако, вода имеет превышения ПДК по нитратам, железу, алюминию, бария и по жесткости.

Воды пресные или солоноватые жесткие или очень жесткие с минерализацией 0,9 - 1,1 г/л. По химическому составу сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые или кальциево-магниевые.

$$M(0,7 - 1,0) \frac{HCO_3(57-80) SO_4(10-29) Cl(5-16)}{Ca(30-68) Mg(20-53) Na(11-34)} pH(7-7,5)$$

На участках, где породы карадагской серии перекрыты другими отложениями, экзогенная трещиноватость отсутствует и водопроявлений нет. Например, под г. Белой население целой улицы испытывает острые проблемы с водой – дома стоят на плотных мергелях (K_{2s}), перекрывающих водоупорную вулканогенно-осадочную толщу.

В северной части д. Трудолюбовки имеется аномальный участок солоноватых мягких хлоридно-натриевых вод. В одной из скважин была произведена откачка, в результате чего установлено, что притоки воды осуществляются из нескольких горизонтов. Хлоридно-натриевые воды с минерализацией до 3 г/л поступают с глубины более 20 м (из области развития пород вулканогенно-осадочной толщи).

$$M(2-2,5) \frac{Cl(63-82) SO_4(9-20) HCO_3(8-11)}{Na(87-96) Ca(3-12) Mg(1-3)} t_{13} pH(8,1-8,7)$$

Данный аномальный участок нарушает единообразие в макрокомпонентном химическом составе природных вод территории. Вероятно, водопроявления связаны с

тектоническими нарушениями и на этом участке осуществляются притоки подземных вод из более глубоких (еще недостаточно промытых от первичного солевого комплекса) горизонтов, после чего они смешиваются с пресными грунтовыми водами. На этом участке притоки подземных вод такого химического состава возможны из отложений вулканогенно-осадочной толщи.

Трещинные воды зоны экзогенной трещиноватости имеют другой химический состав и меньшую минерализацию вследствие хорошей промытости зоны.

С глубиной экзогенная трещиноватость постепенно затухает, и толща становится водоупорной. Вулканогенно-осадочные породы карадагской серии наряду с верхнетриасово-нижнеюрскими дислоцированными флишевыми отложениями формируют нижний структурный этаж, который является региональным водоупором.

Локальные водопроявления в породах таврической (Т₃-J₁tv) и эскиординской серии (Т₃-J₁es) могут образовываться в зонах трещиноватости (экзогенной, тектонической, дробления) флишевых отложений таврической серии или в толще тонкообломочных алевроито-глинистых пород с прослоями мелкозернистых песчаников эскиординской серии.

Слаборазвитой трещиноватостью объясняется маловодность или полное отсутствие подземных вод в толщах эскиординской серии, обнажающихся в виде узкой полосы от северных склонов плато Патиль до южной окраины д. Трудолюбовка. Это также подтверждается отсутствием выходов источников на этом участке. Скважины, пробуренные в этих породах, часто безводны.

Трещинные воды, циркулирующие на глубинах 10 - 15 м, – солоноватые натриево-магниевые гидрокарбонатные щелочные очень жесткие (более 12 мг-экв./л), с содержанием бора 0,4 мг/л, лития 0,12 мг/л, железа 0,08 - 0,19 мг/л:

$$M(1-1,5) \frac{HCO_3 (75-83) SO_4 (10-13) Cl (4-11)}{Mg (50-60) Na (26-32) Ca (3-16)} pH(7-7,8)$$

Воды, связанные с корой выветривания сланцев таврической серии, выходят на поверхность в виде маломощных родников или вскрываются колодцами с крайне низким дебитом. Воды грунтовые трещинные или трещинно-жильные очень жесткие (12,8 – 14 мг-экв./л) от пресных до солоноватых гидрокарбонатно-сульфатных или сульфатно-гидрокарбонатных магниевых-кальциевых, с содержанием железа 0,35 мг/л, марганца 0,27 мг/л. Состав вод изменчив, очень зависит от количества атмосферных осадков.

$$M(0,9 - 1,3) \frac{SO_4 (40 - 70) HCO_3 (28 - 52)}{Ca (49 - 63) Mg (12 - 34) Na (11 - 17)} pH (7,5 - 8,0)$$

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

1. Геологический разрез бассейна р. Бодрак представлен отложениями пород мезозойского и кайнозойского возраста: верхнетриасово-нижнеюрские дислоцированные флишевые и вулканогенно-осадочные среднеюрские отложения с угловым несогласием перекрываются моноклинально залегающими терригенными и слабозакарстованными карбонатными породами мелового и палеогенового возраста, падающими на северо-запад под углами 5-10°. Четвертичные отложения слагают террасы рек и конусы выноса.

2. Территория северо-западных склонов Крымских гор, сложенная терригенно-карбонатными породами мелового и палеогенового возраста, относится к внутренней области питания Альминского артезианского бассейна; р. Бодрак, пересекая отложения мелового возраста (Внутренняя гряда) и неогенового возраста (Внешняя гряда), питает основные водоносные горизонты Альминского артезианского бассейна, теряя значительное количество своих вод на инфлюацию и инфильтрацию.

3. Согласно стратиграфическому положению водовмещающих пород и их литологическому составу, на территории выделены:

Четвертичный водоносный горизонт (Q);

Среднеэоценовый водоносный горизонт (P_{2l});

Датско-инкерманский водоносный комплекс (P_{1d-m});

Верхнетуронско-коньякский водоносный горизонт (K_{2t2}-K_{2k});

Верхнеальбско-нижнесеноманский водоносный горизонт (K_{1al3}- K_{2s1});

Валанжин-нижнебарремский водоносный горизонт (K_{1v-h2}¹, K_{1h2}²-br₂¹);

Водоносная зона вулканогенно-осадочной толщи (J_{2b}).

4. На изучаемой территории наибольшее развитие получили грунтовые воды активного водообмена, приуроченные к четвертичным отложениям (аллювиальным, пролювиальным, делювиальным), к терригенно-карбонатным отложениям мелового, палеогенового и неогенового возраста, а также к корам выветривания коренных пород. Химический состав грунтовых вод в среднем сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый с минерализацией от пресных до солоноватых.

Глава 4. ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД БАСЕЙНА РЕКИ БОДРАК

4.1. Гидрохимическое опробование

В результате ежегодного опробования (начиная с 1998 г.) накоплен достаточно большой фактический материал, связанный с исследованиями подземных и поверхностных вод, а также вод атмосферных осадков. В результате были выявлены особенности химического состава природных вод бассейна р. Бодрак. Опробование природных вод осуществлялось исключительно в летний период. Расположение точек опробования представлено на схеме фактического материала (рис. 15). В приложениях 3 – 6 представлены содержания микрокомпонентов в водах изученных водных объектов.

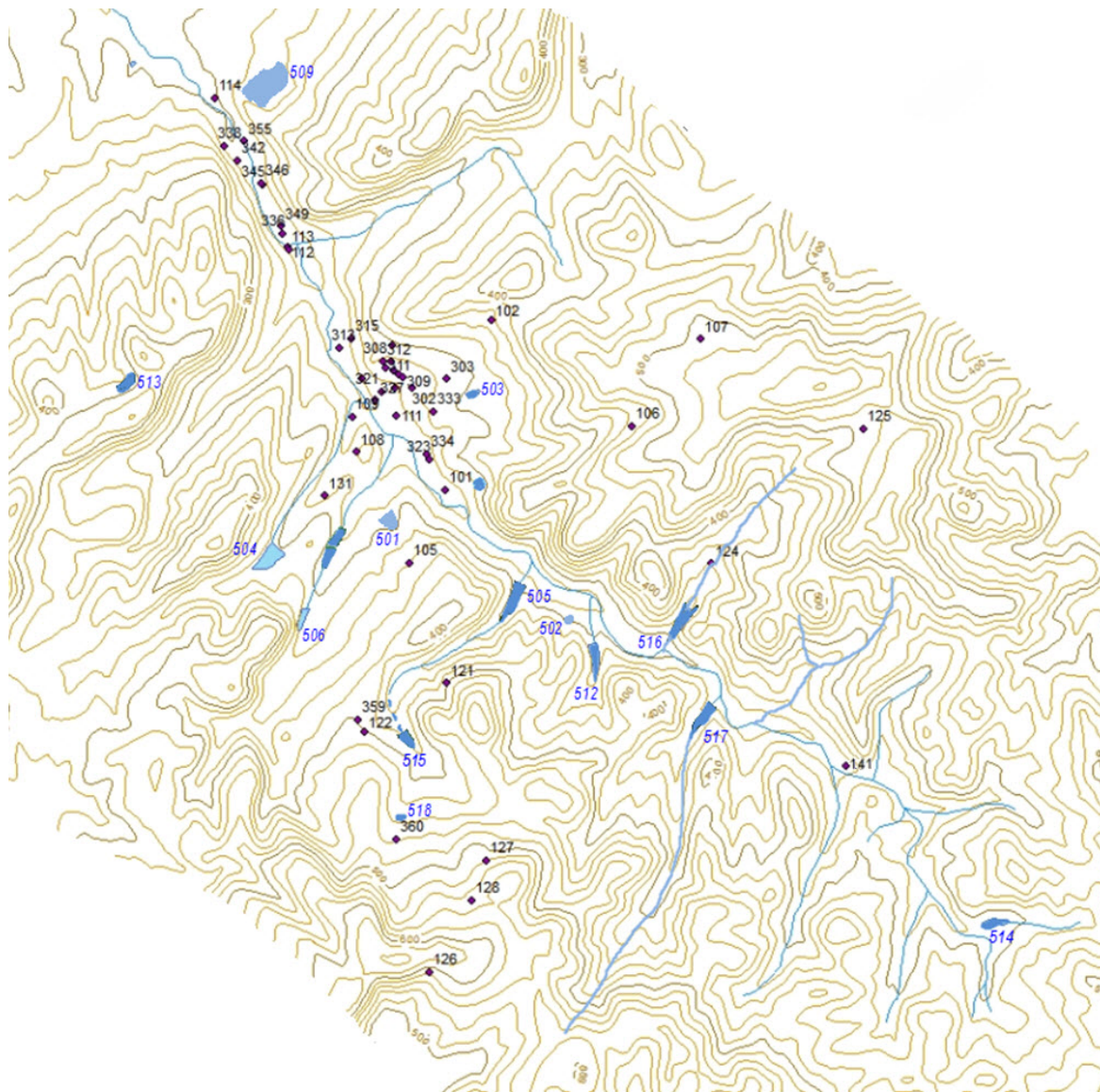


Рис. 15. Схема точек опробования бассейна р. Бодрак

4.2. Результаты мониторинга атмосферных осадков

Всего за анализируемый период (с 1999 г. по 2010 г.) было отобрано 47 проб атмосферных осадков; 35 проб проанализированы на основные анионы и катионы, причем 22 из них с отдельным определением Na^+ и K^+ [48, 52, 66].

Координаты пункта сбора осадков – 44°47'10" N, 33°59'59" E (территория учебно-научной базы СПбГУ в Крыму, д. Трудолюбовка). Образцы проб дождевых осадков собирались в пластиковую емкость на поляне вдали от деревьев на некотором расстоянии от поверхности земли.

По преобладающим компонентам за исследуемый период более 30 % проб атмосферных осадков - гидрокарбонатные кальциевые, 18 % - сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые, 15 % - гидрокарбонатные натриево-кальциевые, 12 % - сульфатно-гидрокарбонатные натриево-кальциевые. Величина pH в осадках варьировала от слабокислых до слабощелочных со средним значением 7,0 (медиана 6,8), удельная электропроводность принимала значения от 15 до 185 мкСм/см (средняя минерализация составила 40 мг/л).

Средние значения ионного состава осадков, использованные при построении графиков на рисунке 16, рассчитывались следующим образом: суммировались средние значения за июнь-июль каждого конкретного года и затем вычислялось среднее значение за период исследования. Средневзвешенные значения концентрации ионов в осадках вычислялись с учетом количества атмосферных осадков: показатель умножался на количество выпавших осадков (по данным метеостанции пос. Почтовое), затем данные суммировались и делились на общее количество осадков.

При построении графика и диаграммы на рисунке 16 использована выборка из 40 проб атмосферных осадков (в том числе 18 проб для Na^+ и K^+ , 13 проб для NO_3^-). Среди исследуемых проб одни были отобраны при ливнях или затяжных дождях и другие, которые отобраны при выпадении крайне малых количеств осадков, а также при слое 0,0 мм по данным метеостанции пос. Почтовое. Именно эти пробы (отобранные при слое осадков 0,0 мм) отличает больший разброс значений минерализации и концентрации некоторых макрокомпонентов (рис. 16 и 17). В летний период перед дождем воздух насыщен пылеватыми частицами, которые при формировании капель дождя вовлекаются в этот процесс (первые порции дождя обогащены ионами сильнее, последующих).

По мнению А. М. Никанорова [102] – содержание солей в атмосферных осадках находится в прямой зависимости от запыленности атмосферы и в обратной - от суммы

выпадающих осадков, следовательно, средневзвешенные значения в составе осадков должны быть ниже среднеарифметических. В нашем случае средневзвешенные значения получились для ряда компонентов несколько выше средних арифметических (рис. 16), что можно объяснить тем, что, несмотря на близость метеостанции (около 6 км), данные по количеству выпавших осадков получаемые на метеостанции близки, но не тождественны местным значениям. Имеется и разница в высотных отметках – около 100 м.

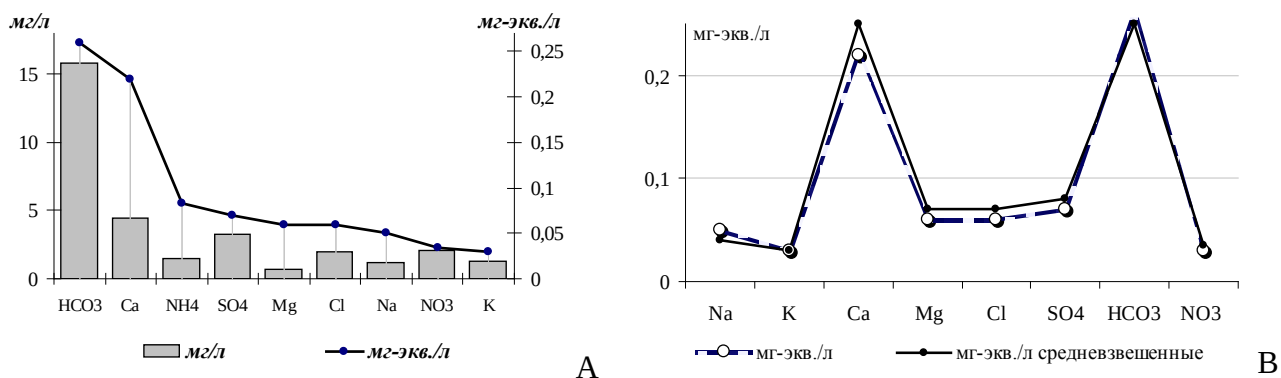


Рис. 16. Средние средних (А) и средневзвешенные (В) значения компонентов атмосферных осадков, июнь-июль 1999 – 2010 гг., д. Трудолюбовка, Крым

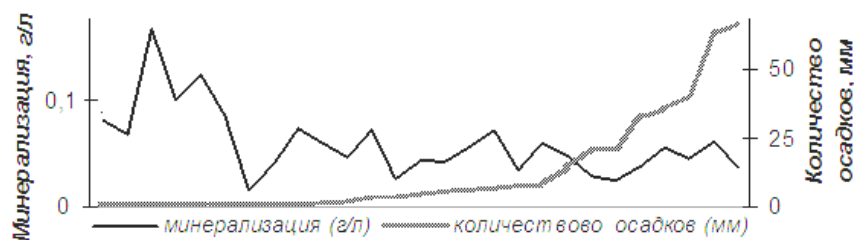


Рис. 17. Зависимость минерализации атмосферных осадков от их количества

Средний состав основных компонентов в атмосферных осадках крымского предгорья в летний период с 1999 по 2010 гг. представлен в таблице 3 и рисунке 18. Среди макрокомпонентов особенно концентрации кальция ощутимо изменились при пересчете на средневзвешенное количество (рис. 16), его содержание в атмосферных осадках больше, чем у других компонентов зависит от продолжительности и интенсивности выпадения осадков, что возможно связано с запыленностью атмосферы в летний период.

Ионный состав осадков характеризуется пестротой, однако главную роль в летние месяцы среди анионов постоянно играет HCO_3^- , а среди катионов обычно Ca^{2+} (90% всех проанализированных проб). Средние эквивалентные концентрации компонентов в составе осадков ведут себя следующим образом: анионы - $\text{HCO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, катионы - $\text{Ca}^{2+} > (\text{Mg}^{2+} \text{ или } \text{Na}^+) > \text{K}^+$. При интерпретации, аномально выделяющиеся значения, не рассматривались, чтобы исключить случаи случайного загрязнения проб.

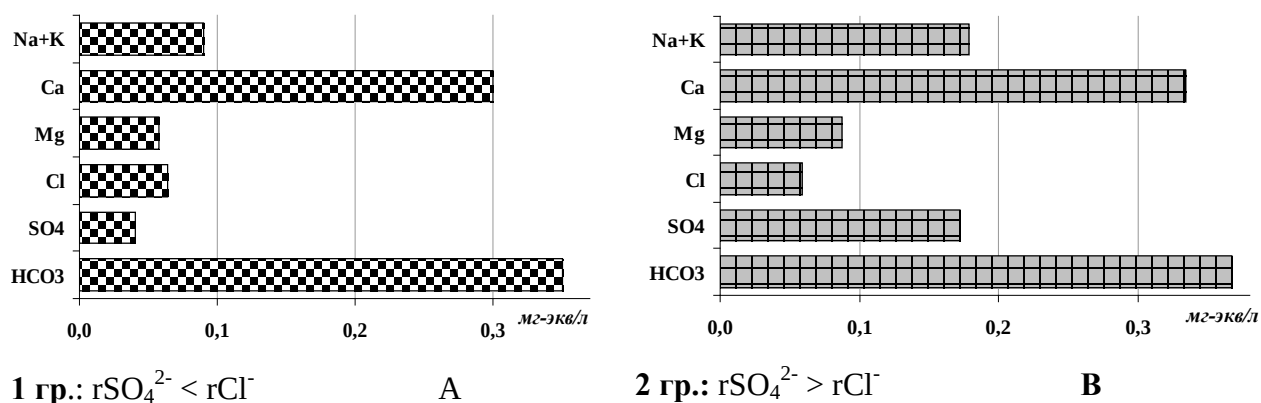


Рис. 18. Концентрации основных компонентов атмосферных осадков в зависимости от соотношений анионов SO_4^{2-} и Cl^- : рис. А - $rSO_4^{2-} < rCl^-$; рис. В - $rSO_4^{2-} > rCl^-$ (при построении использованы 39 проб атмосферных осадков, собранных в июне-июле 1999-2010 гг.)

Таблица 3

Средний состав основных компонентов в атмосферных осадках крымского предгорья (июнь-июль, 1999 - 2010 гг.)

	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	NH ₄	pH
	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	
средние	1,78	2,37	6,34	0,88	2,18	5,10	21,88	2,08	1,5	6,98
медиана	1,24	1,56	6,07	0,67	1,80	4,70	19,50	1,1	—	6,92
минимум	0,69	0,31	2,66	0,31	0,43	0,00	12,00	0,02	—	5,9
максимум	4,34	10,78	14,00	2,30	5,86	19,00	48,80	6,0	—	8,9
дисперсия	1,19	6,50	9,29	0,34	2,54	23,61	76,31	4,48	—	0,83
стандартн. отклонение	1,09	2,55	3,05	0,58	1,60	4,86	8,74	2,12	—	0,91
коэфф. вариации	61,2	107,7	48,1	66,3	73,2	95,2	39,9	101,78	—	13,09
стандартн. ошибка	0,26	0,60	0,72	0,14	0,38	1,15	2,06	0,59	—	0,18

Примечание: для Na и K использована выборка из 18 проб; для pH использована выборка из 20 проб; для NO₃ использована выборка из 13 проб; для NH₄ – 1 проба; для всех остальных показателей – 47 проб атмосферных осадков

По преобладающим ионам А.А. Матвеев и О.И. Башмакова делят атмосферные осадки на шесть основных групп [95]. Атмосферные осадки, выпадающие в районе Второй гряды Крымских гор, по этой классификации относятся к пятой группе гидрокарбонатных кальциевых вод. Такие же осадки (по данным А.М. Никанорова [102]) выпадают в горных районах Кавказа. Максимальные вариации концентраций элементов приходятся на ионы K^+ , NO_3^- и SO_4^{2-} (около 108, 102 и 95% соответственно). Относительная изменчивость остальных ионов - в пределах 40 – 73%, с минимальными значениями для HCO_3^- .

В таблице 4 приведены результаты корреляционного анализа компонентов химического состава атмосферных осадков, выпавших в пределах Второй гряды Крымских гор. Большинство основных ионов (за исключением иона Cl^-) имеют значительную положительную корреляцию с минерализацией: Ca^{2+} (0.8), HCO_3^- (0.7).

Высокая корреляция Ca^{2+} и HCO_3^- предполагает, что эти ионы, вероятно, имеют общий источник. Высокая корреляция Na^+ и Cl^- также подразумевает их общее происхождение (вероятно, в виде NaCl). Такие компоненты как Al, Fe, Si не имеют значительных корреляций с основными ионами дождевых вод (таблица 4).

Таблица 4

Корреляционная матрица компонентов химического состава атмосферных осадков

	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	Al	Fe	Si	Sr
Na	1	0.43	0.12	0.32	0.7	0.47	0.46	0	0.02	0.36	-0.21	0.72
K	0.43	1	0.11	0.53	0.74	0.73	0.05	0.17	-0.13	0.13	-0.06	0.31
Ca	0.12	0.11	1	0.45	0.43	0.31	0.74	0.1	0.06	-0.06	0.28	0.62
Mg	0.32	0.53	0.45	1	0.46	0.5	0.47	0.7	0.06	0.04	-0.08	0.32
Cl	0.7	0.74	0.43	0.46	1	0.55	0.11	0.25	0.06	-0.07	0.46	0.26
SO ₄	0.47	0.73	0.31	0.5	0.55	1	0	0.24	0.02	0.12	0.04	0.4
HCO ₃	0.46	0.05	0.74	0.47	0.11	0	1	-0.05	0	0.14	-0.02	0.75
NO ₃	0	0.17	0.1	0.7	0.25	0.24	-0.05	1	-0.68	-0.26	-0.07	0.24
Al	0.02	-0.13	0.06	0.06	0.06	0.02	0	-0.68	1	0.37	0.44	-0.02
Fe	0.36	0.13	-0.06	0.04	-0.07	0.12	0.14	-0.26	0.37	1	-0.48	0.24
Si	-0.21	-0.06	0.28	-0.08	0.46	0.04	-0.02	-0.07	0.44	-0.48	1	-0.02
Sr	0.72	0.31	0.62	0.32	0.26	0.4	0.75	0.24	-0.02	0.24	-0.02	1

$r < 0.05$

4.3. Гидрохимический режим поверхностных вод бассейна р.Бодрак

4.3.1. Химический состав водоемов (ставков)

Химический состав поверхностных вод бассейна р. Бодрак чутко реагирует на количество атмосферных осадков, выпавших за гидрологический год. Наибольшей минерализацией отличается Мраморный ставок, расположенный в карьере нуммулитовых известняков, наименее минерализованным является Кагульчик в верховьях р. Бодрак.

По своему ионному составу поверхностные воды ставок разнообразны, в большинстве своем это воды умеренно жесткие сульфатно-гидрокарбонатного магниево-кальциевого или гидрокарбонатно-кальциевого состава:

$$\text{M}(0,2 - 0,6) \frac{\text{HCO}_3(55 - 85) \text{SO}_4(2 - 35) \text{Cl}(5 - 23)}{\text{Ca}(47 - 79) \text{Mg}(10 - 45) \text{Na}(10 - 31) \text{K}(1 - 7)} \text{pH}(6 - 8).$$

В ставках расположенным ближе к верховьям р. Бодрак эквивалент-процентное содержание Mg выше, чем в ставках, расположенных в среднем течении реки. В ставке Кагульчик, расположенном в верховьях, концентрации Mg и Ca равны.

На общем фоне выделяется макрокомпонентный состав вод Мраморного ставка, расположенного в бывшем карьере нуммулитовых известняков (п. Скалистое). Здесь, в

отличие от всех других поверхностных вод бассейна р. Бодрак в анионном составе преобладают сульфаты:

$$M(0,3 - 0,8) \frac{SO_4(65 - 78) HCO_3(17 - 24) Cl(5 - 8)}{Ca(51 - 67) Mg(19 - 29) Na(12 - 16) K3} pH(6 - 8)$$

4.3.2. Гидрохимический режим р. Бодрак

В летние месяцы воды р. Бодрак в среднем течении имеют устойчивый сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый состав:

$$M(0,5 - 0,6) \frac{HCO_3(51 - 69) SO_4(22 - 40)}{Ca(47 - 51) Mg(29 - 33) Na(14 - 18) K(1 - 2)} pH(7,3 - 7,6).$$

В верховьях реки (на территории развития флишевых отложений, T_3-J_2 tv) наблюдается преобладание магния в катионном составе и большие концентрации сульфатов (по сравнению с участками в среднем и нижнем течении реки), минерализации имеют более низкие значения:

$$M(0,6 - 0,7) \frac{HCO_3(49 - 63) SO_4(26 - 45) Cl(7 - 12)}{Mg(40 - 41) Ca(37 - 40) Na(18 - 21) K(1)} pH(7,2 - 7,5)$$

В 2007 и 2010 гг. в водных пробах, отобранных в среднем течении р. Бодрак, в катионном составе на первое место выходит Mg. Эти года объединяет то, что в майские месяцы этих лет было мало осадков, и вероятно речной сток осуществлялся преимущественно за счет подземного стока, то есть вклад подземной составляющей в речном стоке преобладал над инфильтрационной составляющей.

4.4. Формирование химического состава подземных вод бассейна р. Бодрак

4.4.1. Основные факторы формирования подземных вод

Химический состав подземных вод изучаемой территории формируется под действием природных изменений и антропогенных факторов, основными выступают - физико-географические, геологические и физико-химические факторы.

Динамический и химический режимы подземных вод непостоянны. Общая закономерность для предгорий Крымских гор проявляется в годовой периодичности (колебание уровня грунтовых вод в связи с сезонностью питания). На весенний период приходятся максимумы уровня грунтовых вод. Весной происходит таяние снега, при этом и температура, и дефицит влажности воздуха, и испарение влаги невелики, что обеспечивает наиболее благоприятные условия для инфильтрации атмосферных осадков. Если в период и

после снеготаяния идут дожди – это значительно увеличивает период питания грунтовых вод (на снеговую составляющую приходится не более 10% годовой суммы осадков).

Воды аллювиальных отложений особенно чутко реагируют на количество выпавших атмосферных осадков, так как аллювиальный водоносный горизонт имеет гидравлическую связь с подрусловыми водами р. Бодрак. Происходит регулирование речного стока (речные воды Предгорьев Крыма питают подземные воды в паводки, а в межень дренируют часть воды из водоносных зон и горизонтов). Подрусловой сток р.Бодрак подпирает грунтовые воды, тормозя подземный сток в долину реки.

Летний и осенний уровни грунтовых вод напрямую зависят от весеннего уровня и летних климатических условий (осадки, температура воздуха). Большую роль при этом играют лесной и растительный покровы, которые защищают неглубоко залегающие грунтовые воды от интенсивного испарения.

По данным режимных наблюдений 1998-2015 годов многолетняя амплитуда колебания уровней в бассейне р. Бодрак составила: 0,5-1,5 м для грунтовых вод аллювиальных отложений, 1,5-2 м для грунтовых вод вулканогенно-осадочной водоносной зоны. Температурный режим подземных вод в летний период около 11 - 15°C, при этом он неплохо согласуется с температурой воздуха с разницей около 8°C. В июле 2007 г. проводились суточные измерения температур у режимных родников через каждые два часа (с ночным промежутком – 4 ч.), перепад ночных - дневных температур составил – от 1 до 1,5°C.

Влияние сезонных изменений температур и сезонная неравномерность выпадения атмосферных осадков (и связанные с ними процессы выщелачивания и испарения) обуславливают непостоянство химического состава подземных вод. С наиболее высоким уровнем грунтовых вод вследствие их разбавления атмосферными осадками связаны минимальные минерализации. За период исследования отмечены некоторые изменения химического состава подземных вод, обусловленные межгодовыми и внутригодовыми вариациями количеств выпадающих атмосферных осадков, но в первую очередь температурным режимом (контролирующим процессы испарения).

4.4.2. Химический состав

Грунтовые воды района, циркулирующие в отложениях разного возраста и литологического состава, вследствие активного водообмена и хорошей промытости - маломинерализованы (около 1 г/л). Преобладающими компонентами в химическом составе обычно являются HCO_3^{3-} и Ca^{2+} , однако в водах, связанных с областью интенсивных тектонических преобразований (эскиардинская серия, Т₃-J₁es) на первое место в катионном

составе выходит Mg. Условия pH близки к нейтральным. В притоках подземных вод из области замедленного водообмена преобладающими ионами являются Na^+ и Cl^- . В таблице 5 представлен макрокомпонентный состав подземных вод различных вмещающих отложений и атмосферных осадков бассейна р. Бодрак. Для сравнения приведен средний химический состав подземных вод зоны гипергенеза по данным С.Л. Шварцева [138].

По данным 75 полных анализов найдена зависимость минерализации подземных вод активного водообмена бассейна р. Бодрак от их удельной электропроводности (0,874 УЭП); на рисунке 19 представлен график зависимости.

Таблица 5

Макрокомпоненты, pH и минерализация подземных вод и атмосферных осадков

Комп-т мг/л мг-экв/л	Область активного водообмена					Замедленный водообмен	Атм. осадки	Зона гипергенеза (С.Л. Шварцев)
	$\text{T}_3\text{-J}_1$ tv	$\text{T}_3\text{-J}_1$ es	J_2b	K_1	P_2			
Na^+	<u>48,6</u> 2,1	<u>117,5</u> 5,1	<u>50,3</u> 2,2	<u>12,7</u> 0,55	<u>32,0</u> 1,4	<u>700,0</u> 30,4	<u>1,78</u> 0,08	45,50
K^+	<u>19,8</u> 0,5	<u>10,7</u> 0,27	<u>3,2</u> 0,08	<u>2,4</u> 0,06	<u>5,6</u> 0,14	<u>8,0</u> 0,2	<u>2,37</u> 0,06	4,59
Ca^{2+}	<u>115,9</u> 5,8	<u>49,0</u> 2,45	<u>99,9</u> 5,0	<u>87,4</u> 4,37	<u>106,8</u> 5,34	<u>47,2</u> 2,36	<u>6,34</u> 0,32	43,90
Mg^{2+}	<u>31,5</u> 2,6	<u>115,0</u> 9,46	<u>45,6</u> 3,75	<u>6,9</u> 0,57	<u>23,0</u> 1,89	<u>9,7</u> 0,8	<u>0,88</u> 0,07	18,60
Cl^-	<u>39,1</u> 1,1	<u>67,1</u> 1,89	<u>47,9</u> 1,35	<u>19,7</u> 0,55	<u>46,2</u> 1,3	<u>887,5</u> 25,0	<u>2,18</u> 0,06	47,00
SO_4^{2-}	<u>138,4</u> 2,9	<u>60,0</u> 1,25	<u>53,7</u> 1,12	<u>26,8</u> 0,56	<u>80,0</u> 1,67	<u>250,0</u> 5,21	<u>5,1</u> 0,11	75,10
HCO_3^-	<u>416,8</u> 6,8	<u>756,4</u> 12,4	<u>449,8</u> 7,37	<u>319,7</u> 5,24	<u>353,8</u> 5,8	<u>219,6</u> 3,6	<u>21,88</u> 0,36	174,00
NO_3^-*	<u>33,0</u> 0,5	<u>3,5</u> 0,1	<u>123,0</u> 2,0	<u>5,1</u> 0,1	<u>89,9</u> 1,5	<u>4,0</u> 0,1	<u>2,0</u> 0,03	3,4
Мин-я г/л	0,91	1,18	0,92	0,48	0,75	2,15	0,04	0,43
pH	8,4	7,2	7,5	7,1	7,5	8,4	6,98	
$\text{Ж}_{\text{капб.}}$ мг-экв/л	1,6	12,4	1,4	4,9	1,4	3,2	0,03	
$\text{CO}_2^{\text{своб.}}$ мг/л	2,5	63,8	20,6	34,3	16,3	1,2	3,1(3,0**)	

** $\text{CO}_{2\text{атрес.}}$ в атмосферных осадках (в подземных водах $\text{CO}_{2\text{атрес.}} = 0$)

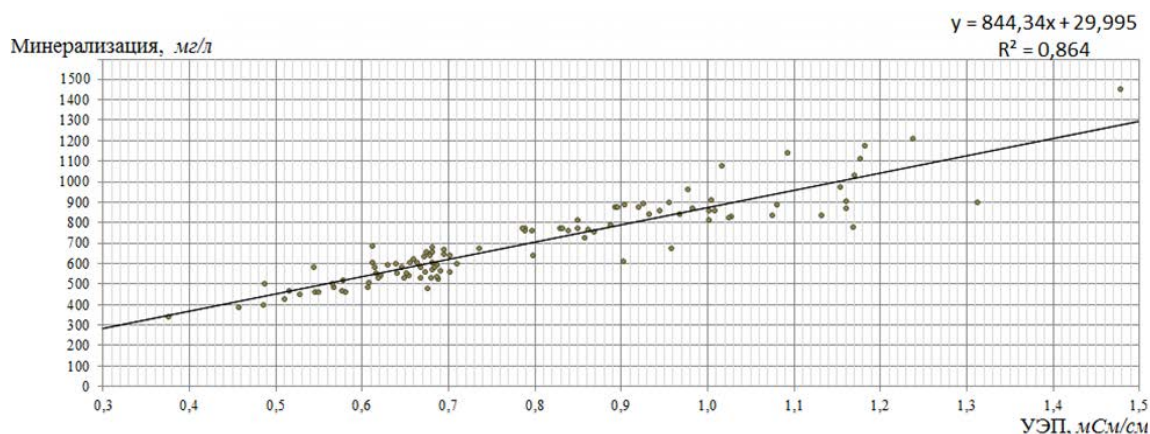


Рис. 19. Зависимость минерализации от удельной электропроводности

Статистические характеристики макрокомпонентов, минерализации, удельной электропроводности и жесткости представлены в таблице 6, построенной в программе STATISTICA. Из таблицы следует, что минерализация подземных вод активного водообмена бассейна р. Бодрак в среднем составляет 746,5 мг/л и формируется главным образом за счёт ионов гидрокарбоната (примерно на 60%) и, во вторую очередь кальция (14%). Концентрации HCO_3^- отличаются сильной изменчивостью - они имеют наибольшие отклонения от среднего значения (максимальны дисперсия и стандартное отклонение).

Таблица 6

Статистические характеристики основных показателей химического состава
подземных вод активного водообмена

	ед. измерен.	кол-во проб	среднее	медиана	мини- мум	макси- мум	дисперсия	среднеквад- ратичное отклонение	коэффициент вариации	стандартная ошибка
М-я	мг/л	154	746,5	746,4	110,1	1479,0	49136,4	221,7	29,7	17,9
УЭП	мСм/см	75	0,861	0,850	0,457	1,530	0,05	0,23	26,5	0,03
Ж	мг-экв/л	154	8,2	8,0	2,7	15,9	5,9	2,4	29,8	0,2
Na^+	мг/л	154	39,1	33,1	5,6	170,0	837,3	28,9	74,1	2,3
K^+	мг/л	151	5,1	3,2	0,1	65,8	75,0	8,7	169,8	0,7
Ca^{2+}	мг/л	154	107,0	110,0	11,0	160,0	626,6	25,0	23,4	2,0
Mg^{2+}	мг/л	154	34,2	29,4	3,4	140,0	661,9	25,7	75,2	2,1
Cl^-	мг/л	153	38,4	35,5	6,7	134,9	447,5	21,2	55,1	1,7
SO_4^{2-}	мг/л	94	86,7	87,0	19,5	300,0	305,6	17,5	60,5	1,8
HCO_3^-	мг/л	152	442,9	427,0	244,0	756,4	11054,2	105,1	23,7	8,5
NO_3^-	мг/л	53	38,9	9,9	0,9	210,0	3276,3	57,2	147,2	7,9

В таблице 7 представлена корреляционная матрица жесткости, минерализации и концентраций макрокомпонентов в составе подземных вод области активного водообмена бассейна р. Бодрак (критическое значение коэффициента корреляции $r=0,25$ при уровне значимости $\alpha = 0.05$.) Для подземных вод выявлена жесткая положительная корреляция между минерализацией и концентрацией HCO_3^- (0.9), минерализацией и жесткостью (0.9), минерализацией и Mg^{2+} (0.8), минерализацией и SO_4^{2-} (0.8). При этом жесткая положительная корреляция между минерализацией и Mg^{2+} характерна и для атмосферных осадков (0.7, табл. 4); в них же - жесткая положительная корреляция между минерализацией и Ca^{2+} (0.8).

Интересно отметить, что корреляционная связь HCO_3^- и Ca^{2+} в подземных водах бассейна р. Бодрак слабая (0.3), в то время как в атмосферных осадках коэффициент корреляции равен 0,7 (табл. 4, табл. 7). При этом в подземных водах готеривских известняков выявлена жесткая корреляция между HCO_3^- и Ca^{2+} (0,8). То есть, в инфильтрационных водах бассейна р. Бодрак уже на первых стадиях фильтрации происходят некоторые изменения в химическом составе в зависимости от литологического состава вмещающих отложений. Надо отметить, что существенно меняется роль K^+ . В атмосферных осадках коэффициент

корреляции K^+ с SO_4^{2-} и Cl^- составлял 0,7, при этом его концентрации в атмосферных осадках достигали 15 экв%. Коэффициент $r_{Na/gK}$ в подземных водах около 22-25, в поверхностных – 8-14, в атмосферных осадках около 1.

Таблица 7

Корреляционная матрица макрокомпонентов и минерализации подземных вод области активного водообмена бассейна р. Бодрак

	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	Мин-я	Жестк.
Na	1,0	0,4	0,2	0,7	0,7	0,8	0,6	0,7	0,7
K	0,4	1,0	0,2	0,0	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1
Ca	0,2	0,2	1,0	0,0	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5
Mg	0,7	0,0	0,0	1,0	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9
Cl	0,7	0,3	0,3	0,6	1,0	0,6	0,6	0,7	0,6
SO ₄	0,8	0,3	0,4	0,6	0,6	1,0	0,6	0,8	0,8
HCO ₃	0,6	0,2	0,3	0,7	0,6	0,6	1,0	0,9	0,8
Мин-я	0,7	0,3	0,4	0,8	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9
Жестк.	0,7	0,1	0,5	0,9	0,6	0,8	0,8	0,9	1,0

$r < 0,05$

Из катионов высокую корреляционную зависимость с минерализацией в подземных водах показали Na^+ и Mg^{2+} , при этом эти катионы имеют высокую корреляционную связь и с ионами SO_4^{2-} . Зависимость анионов и минерализации представлена на рисунке 20.

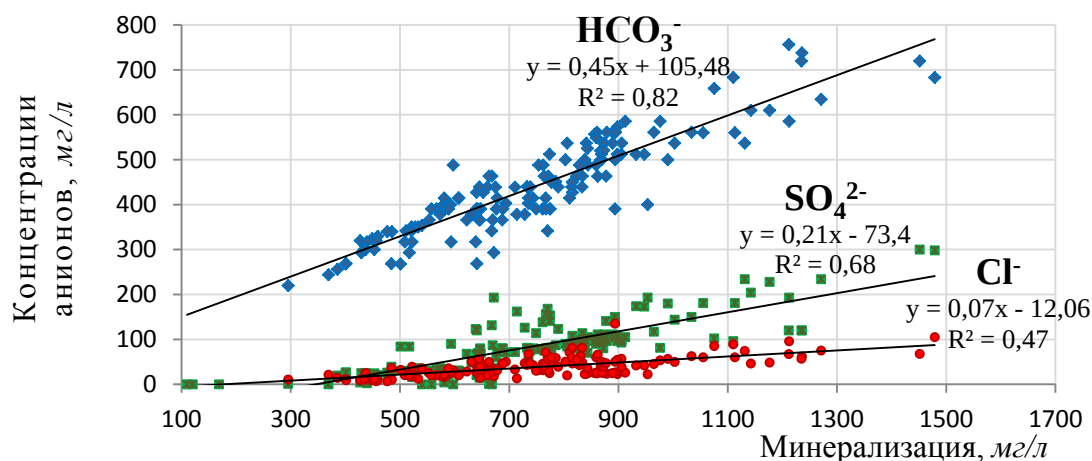


Рис. 20. Связь минерализации и анионного состава в подземных водах бассейна р.Бодрак

На рисунке 21 показан химический состав подземных вод и атмосферных осадков на диаграмме Дурова. Несмотря на то, что все подземные воды активного водообмена бассейна р. Бодрак пресные, тем не менее, набор макрокомпонентов не постоянен и варьирует в зависимости от ряда факторов. По данным химических анализов подземных вод бассейна р. Бодрак (на основе возможностей программного пакета Excel) выделено три гидрохимические генерации подземных вод области активного водообмена (рис. 22). Линии тренда получены в результате построения полиномиальных регрессионных кривых, при этом использован полином второй степени.

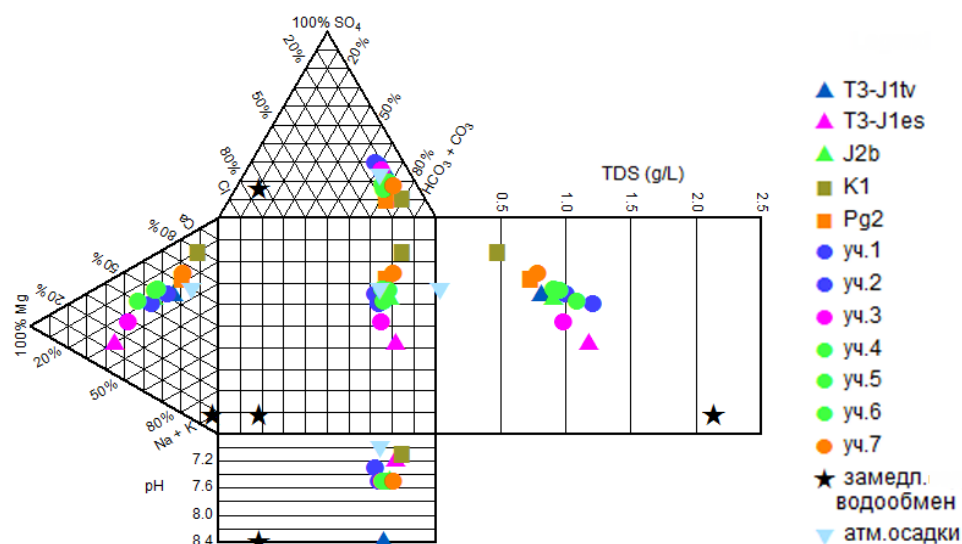


Рис. 21. Химический состав подземных вод и атмосферных осадков на диаграмме Дурова (Расположение участков четвертичного водоносного горизонта указано на рисунке 23)

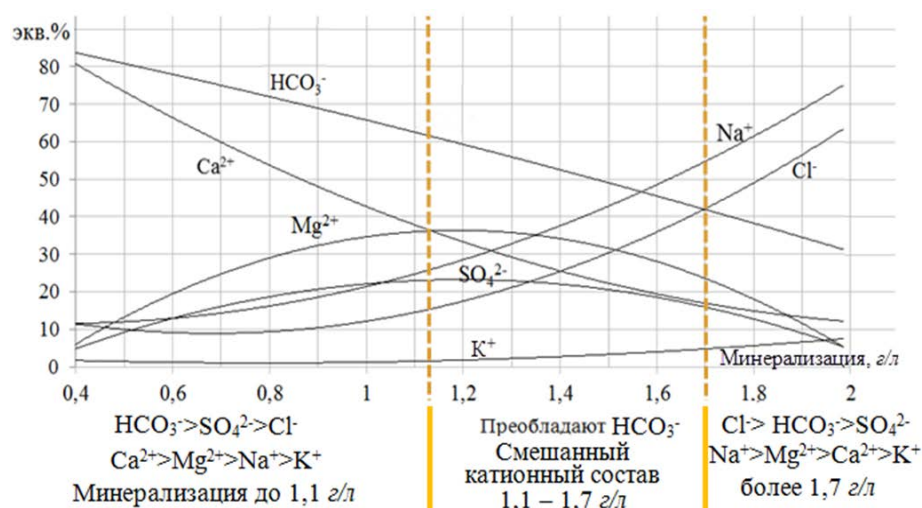


Рис. 22. Связь соотношения макрокомпонентов и минерализации в подземных водах бассейна р. Бодрак (условия окислительные)

В водах с минерализацией до 1 г/л (также как и в атмосферных осадках) наблюдается следующая зависимость в анионном составе - $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ и в катионном составе - $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. С ростом минерализации этот порядок нарушается и в подземных водах с минерализацией около 2,0 г/л на первое место выходят Cl^- и Na^+ .

Инфильтрационные воды в зоне гипергенеза, взаимодействуя с вмещающими породами, обогащаются разными компонентами, при этом идут процессы растворения, окисления, гидролиза, выщелачивания, ионного обмена, смешения вод и пр. При определенных климатических условиях вследствие испарения отдельные компоненты могут высаживаться из водного раствора. Все эти процессы приводят к увеличению минерализации и изменению эквивалентных соотношений в макрокомпонентном составе подземных вод.

В таблице 8 представлен средний состав микрокомпонентов в подземных водах и атмосферных осадках бассейна р. Бодрак. Для сравнения приведены данные среднего состава вод зоны гипергенеза [50, 67, 69, 138].

Таблица 8

Средний состав микрокомпонентов в подземных водах и атмосферных осадках, мг/л

Хим. элемент	Активный водообмен				Р ₂	Замедленный водообмен	Атм. осадки	Зона гипергенеза [138]
	T ₃ -J ₁ tv	T ₃ -J ₁ es	J ₂ b	K ₁				
Ag	0,0013	0,001	0,004	0,001	0,009	0,04	0,00269	0,00029
Al	0,18	0,16	0,19	0,20	0,34	1,1	0,1724	0,279
As	0,0013	0,0016	0,0013	0,0002	0,0018	0,0025	0,000799	0,0,00207
B	0,15	0,43	0,09	0,05	0,26	3,9	0,04772	0,0418
Ba	0,40	0,04	0,32	0,30	1,14	0,28	0,1488	0,0196
Cd	0,00008	0,00005	0,00013	0,00009	0,00006	0,0013	0,000117	<0,00033
Co	0,0004	0,0003	0,0004	0,0003	0,0005	0,0012	0,000177	0,00083
Cr	0,0017	0,0012	0,0032	0,0016	0,0017	0,0041	0,00519	0,0029
Cu	0,004	0,002	0,009	0,0029	0,004	0,028	0,03043	0,00558
Fe	0,3	0,14	0,33	0,197	0,36	2,4	0,3662	0,547
Li	0,011	0,120	0,003	0,00476	0,008	0,0038	0,00053	0,014
Mn	0,22	0,006	0,016	0,0047	0,013	0,21	0,01338	0,0494
Mo	0,00046	0,00040	0,00047	0,00055	0,00109	0,007	0,00016	0,00201
Ni	0,0026	0,0031	0,0034	0,0014	0,0031	0,009	0,00678	0,00331
P_{общ}	0,051	0,029	0,033	0,017	0,064	0,005	0,05378	0,0575
Pb	0,0042	0,0009	0,0035	0,001	0,0027	0,02	0,004279	0,00221
Rb	0,0006	0,0043	0,0012	0,0004	0,0014	0,0019	0,08715	0,00222
Sb	0,0011	0,0015	0,0010	0,001	0,0017	0,0025	0,000475	0,00153
Se	0,0014	0,0018	0,0014	0,0013	0,0023	0,011	0,749	<0,00091
Si	6,19	5,55	9,49	6,94	7,75	7,8	1,6303	8,1335
Sn	0,0014	0,0018	0,0020	0,0014	0,002	0,0031	0,0007	0,00041
Sr	0,90	0,92	1,55	0,3	1,13	1,3	0,03749	0,185
Th	0,00005	0,00005	0,00009	<0,0001	0,00021	0,00013	0,000058	0,00042
Ti	0,003	0,001	0,004	0,003	0,005	0,016	0,00895	0,0107
U	0,0006	0,0023	0,0014	0,0017	0,0018	0,001	0,000037	0,0034
V	0,001	0,0008	0,0438	0,0007	0,0015	0,0027	0,000787	0,00155
Zn	0,017	0,01	0,16	0,038	0,06	0,72	0,07822	0,034

Для выявления характерных геохимических ассоциаций, природных и техногенных гидрохимических аномалий в подземных водах бассейна р. Бодрак были рассчитаны коэффициенты концентрации химических элементов [приложение 7]:

$$K_c = C_i / C_{\Phi}, \quad (5)$$

где C_i – средняя концентрация i -го химического элемента в данной выборке,
 C_{Φ} – фоновое содержание этого элемента.

Коэффициент концентрации химического элемента (K_c) характеризует уровень концентрирования элемента на участке опробования (C_i) над его средним содержанием в аналогичной природной среде на фоновом участке (C_f). В качестве фоновых содержаний использованы средние концентрации химических элементов в водах зоны гипергенеза, такие «кларки элементов подземных вод» получены С.Л. Шварцевым на основе обработки более 1000 анализов подземных вод [138, 147]. Результаты расчета представлены в таблице 9.

Таблица 9

Геохимические ассоциации химических элементов и их коэффициенты концентраций в составе подземных вод активного водообмена бассейна р. Бодрак

Возраст	Вмещающие отложения	Геохимические ассоциации микрокомпонентов	Zc
P ₂	органогенные нуммулитовые известняки	Ba _{58,2} – Ag _{31,0} – N* _{26,4} – B _{6,2} – Sr _{6,1} – Sn _{4,9}	133
K ₁	органогенно-обломочные известняки	Ba _{15,2} – Sn _{3,5} – Ag _{3,2}	23
J _{2b}	туфы, туфопесчаники, туфоаргиллиты, аргиллиты с прослоями лав	N* _{36,1} – V _{28,3} – Ba _{16,3} – Ag _{13,8} – Sr _{8,4} – Sn _{4,9} – Zn _{4,7} – B _{2,2}	111
T ₃ -J ₁ es	терригенно-глинистые породы – песчаники, глины, глинистые отложения	B _{10,3} – Li _{8,6} – Sr _{5,0} – Sn _{4,4} – Ag _{3,4} – Ba _{2,0}	33
T ₃ -J ₁ tv	терригенный флиш - чередование аргиллитов, алевролитов, песчаников	Ba _{20,2} – N* _{9,7} – Sr _{4,9} – Mn _{4,6} – Ag _{4,1} – B _{3,5} – Sn _{3,4} – Se _{3,1}	40

Примечание: Элементы с коэффициентом концентрации <2,0 не учитывались; *азот нитратный

После выделения ассоциаций, для количественной характеристики уровня аномальности подземных вод бассейна р. Бодрак, были рассчитаны суммарные интегральные показатели (Zc), которые характеризуют эффект воздействия группы компонентов и представляют собой аддитивную сумму превышений коэффициентов концентрации над фоновыми значениями [23]:

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1),$$

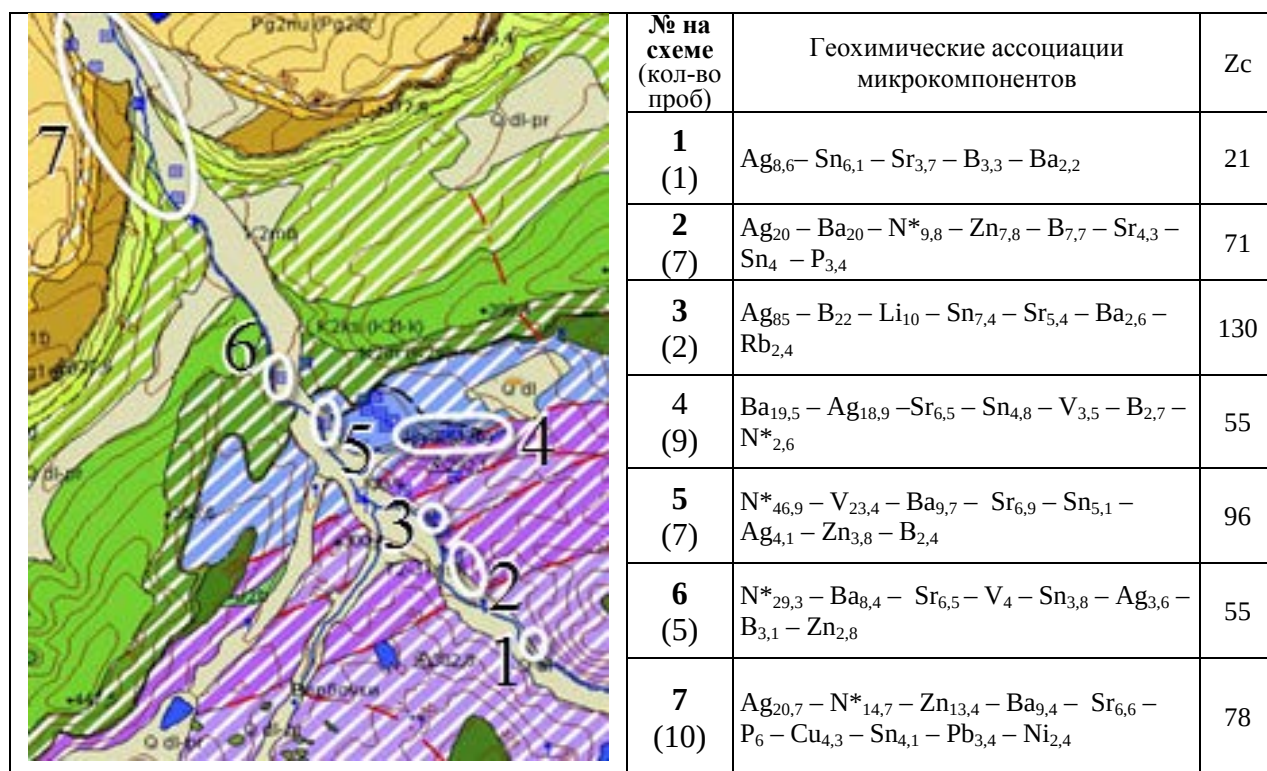
где n — количество учитываемых химических элементов ($K_c > 1$).

На основе расчета интегральных показателей (Zc) выявлено, что наиболее высокое значение Zc (335) связано с подземными водами, поступающими из области замедленного водообмена. Высокие значения соответствуют участкам с повышенной антропогенной нагрузкой: J_{2b} (111) и P₂ (133), где расположены дома местных жителей с подсобными хозяйствами (и туалетами по типу выгребных ям), свинофермы; при этом здесь отмечается маломощный почвенный слой или полное его отсутствие.

Набор химических элементов в ассоциациях (табл. 9), представляющий собой относительные характеристики аномальности, позволяет выделить следующие элементы: Ba (2,0-58,2) – B (1,1-10,3) – Sn (3,4-4,9) – Sr (1,6-8,4), которые являются, вероятно, природной гидрохимической особенностью подземных вод бассейна р. Бодрак.

Азот, характеризующий нитратную составляющую, является главным загрязнителем на территории. Особенно высокими концентрациями NO_3 отличаются водоносная зона вулканогенно-осадочной толщи, где располагается центр д. Трудюлюбовки. В этих же водах наблюдаются наиболее высокие концентрации серебра (на фоне его повышенных содержаний для всех вод в целом), что, вероятно, также вызвано техногенными факторами.

Для полноты представлений были рассчитаны индексы концентраций подземных вод колодцев, располагающихся вдоль реки Бодрак и вдоль оврага Колхозного (Дохлой Лошади). На рисунке 23 показаны опробованные группы, включающие от одного до десяти колодцев, приведены геохимические ассоциации.



Примечание: Элементы с коэффициентом концентрации $< 2,0$ не учитывались; *азот нитратный

Рис. 23. Геохимические ассоциации химических элементов в подземных водах четвертичного водоносного горизонта

Проанализировав два массива данных, замечаем, что химические элементы в грунтовых водах колодцев связаны с элементами подземных вод нижних структурных этажей. Так, ванадий, выявленный в аллювиальных водах участка 5 (рис. 23), вероятно связан с разгрузкой трещинных вод вулканогенно-осадочной толщи (J_{2b}). Такие элементы как В, Li, Rb, U в аллювиальных водах участка 3, по всей видимости, имеют природное происхождение и связаны с трещинными водами зоны меланжа ($\text{T}_3\text{-J}_{1es}$). В аллювиальных водах участка 7 выявилось загрязнение металлами (Zn, Cu, Pb, Ni, Fe) антропогенного характера. Это плотно

застроенная территория д. Скалистое с приусадебными участками, где активно занимаются домашним животноводством и есть небольшое фермерское хозяйство.

Добавив Ag с невысоким индексом концентрации, получим ряд, характеризующий среднюю естественную ассоциацию химических элементов в подземных водах р. Бодрак:

Ba (2,0-58,2) – B (1,1-10,3) – Ag (3,2-8,6) – Sr (1,6-8,4) – Sn (3,4-4,9).

За естественный максимальный индекс концентрации серебра принято значение в подземных водах участка 1 (южная окраина д. Трудолюбовки), находящегося гипсометрически выше других участков опробования. Такая же величина для Ag соответствует родниковым водам источника в верховьях р. Бодрак (родник у шламбаума, код 118, рис. 15).

Высокие содержания бария, относительно средних значений в подземных водах зоны гипергенеза, вероятно связаны с местной спецификой подземных вод. Высокие индексы концентрирования бария позволяют предположить, что барий поступает в подземные воды из отложений, имеющих барий-содержащие минералы (барит, витерит, баритокальцит). Так, из литературных источников известно, что минеральный состав элювия патильской свиты (K₁) на 60% (в составе тяжелой фракции) состоит из барита [2]. При минералогических исследованиях в пещерах Предгорья наряду с доломитом выделен барит [77]. В известняках карбонаты замещаются бариевыми соединениями [136]. В.В.Юдин пишет, что в трещинах кластолитов и в матриксе области меланжа развиты проявления гидротермальных минералов (и в том числе барита) [145].

Источником бора в подземных водах активного водообмена, вероятно, являются горные породы нижнего структурного этажа, в пользу этого предположения говорит то, что в ассоциации нижнемеловых отложений (которые бронируют вершины плоских гор изучаемой территории) бор не играет заметной роли (K_c 1,1).

Для выявления возможных парагенетических связей компонентов подземных вод бассейна был выполнен корреляционный анализ, который показал отсутствие связи бора с какими-либо другими компонентами подземных вод из различных вмещающих отложений зоны активного водообмена. При этом бор в водах из области замедленного водообмена жестко коррелирует с Sn, As, Cr, Al. Наличие корреляционных связей между B, Sn, As, Cr, Al позволяет предполагать о возможном существовании парагенной ассоциации данных элементов. Степень концентрации бора в водах замедленного водообмена относительно средних его содержаний в водах активного водообмена ≈ 20 , что должно быть связано со степенью промытости пород водами инфильтрационного генезиса.

Особый вклад элементов в ряды естественных геохимических ассоциаций микрокомпонентов подземных вод имеют: флишевые отложения (Mn – Se); породы из

области меланжа (Li – Rb); вулканогенно-осадочная толща (V). Так, коэффициент концентрации ванадия в водах вулканогенно-осадочной толщи достаточно высок (Кс 28), такой же высокий коэффициент в четвертичном водоносном горизонте на участке 5 (т.е. ванадий поступает из подстилающих толщ J_{2b}), повышенный (Кс 3,5-4) - на соседних участках 4 и 6 (рис. 23). Таким образом, источник ванадия в подземных водах района – вулканогенно-осадочная толща.

Максимальные коэффициенты концентрации лития (Кс 10 и 8,6) связаны с водами аллювия (участок 3) и подстилающих их терригенно-глинистых толщ (Т₃-J₁ es), которые, вероятно, и являются источником лития в подземных водах. Такая же картина характерна и для рубидия (Кс 2,4 и 1,9), при этом между Rb и Li высокая корреляционная связь 0,9.

Азот, характеризующий нитратную составляющую, является главным загрязнителем на территории. Особенно высоким коэффициентам концентрации азота отвечает водоносная зона вулканогенно-осадочной толщи, где располагается центр д. Трудюлюбовки. В этих же водах наблюдаются наиболее высокие концентрации серебра (на фоне его повышенных содержаний для всех вод в целом), что, возможно, также вызвано техногенными факторами

Для количественной оценки интенсивности водной миграции химических элементов использован коэффициент водной миграции (К_х), предложенной А.И. Перельманом, который представляет отношение содержания химического элемента в минеральном остатке воды к его среднему содержанию во вмещающих породах [69, 115]:

$$K_x = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}, \quad (6)$$

где К_х – коэффициент водной миграции элемента;

m_х – содержание элемента в воде (мг/л); а – минерализация воды (мг/л);

n_х – среднее содержание элемента в верхней части континентальной коры в вес.% (кларк) [109, 154]

Так как формирование химического состава подземных вод явление сложное и в него вовлечены породы самого различного состава, то в качестве величины n_х, по мнению А.И. Перельмана [115], более правильно использовать не содержание элементов в водовмещающих породах, а средние кларки литосферы.

Коэффициенты водной миграции позволяют представить особенности миграции отдельных химических элементов в различных водоносных горизонтах и зонах изучаемого района, оценить степень подвижности элементов. Чем выше коэффициент водной миграции (то есть, чем интенсивнее его водная миграция), тем сильнее химический элемент способен выщелачиваться из вмещающих отложений. Подсчитав коэффициент водной миграции, видим, что высокая интенсивность водной миграции характерна для следующих биофильных

элементов - N, Cl, S, B, Se ($K_x > 10$). Сильными мигрантами ($K_x > 1$) являются основные катионы (Ca, Na, Mg) и элементы Sr, Sb. Наиболее низкая интенсивность водной миграции свойственна таким микроэлементам как Al, Th, Fe, Co, Cr, Rb, Ti. Интенсивность водной миграции химических элементов в подземных водах бассейна р. Бодрак представлена в таблице 10, расчеты приведены в приложении 8.

Таблица 10

Интенсивность водной миграции химических элементов
в подземных водах бассейна р. Бодрак

Возраст вмещающих отложений		Очень Сильная $> n^*10$	Сильная $n^*(1 \div 10)$	Средняя $n^*(0,1 \div 1)$	Слабая и очень слабая $< 0,1n$
Активный водообмен	P_2	N*, Cl, Ag, S, Se, B	Sb, Sr, Ca, Ba, Na, As, Mo, Zn, Sn, Mg, U	K, Cd, Li, Pb, V, Cu, P, Ni	Si, Co, Th, Cr, Mn, Rb, Fe, Al, Ti
	K_1	N*, Cl, S, Se, Ag, B	Sb, Ca, Sr, U, Ba, Sn, Zn, Na, Cd	Mo, Mg, Li, K, As, Pb, V, Cu, Si	Ni, Cr, P, Co, Mn, Th, Fe, Rb, Al, Ti
	J_2b	N*, Cl, Ag, S, Se, B	Sr, V, Sb, Ca, Zn, Na, Mg, Sn, Cd	As, Ba, U, Mo, Pb, Cu, K, Li, Ni	Cr, Si, P, Mn, Co, Rb, Th, Fe, Al, Ti
	T_3-J_{1es}	Cl, N*, S, B, Se, Ag	Mg, Sb, Na, Li, Sr, Ca	As, U, Sn, K, Mo Cd, Zn, Ba, Pb, V	Ni, Rb, Cu, P, Si, Co, Cr, Mn, Th, Fe, Al, Ti
	$T_3-J_1 tv$	N*, Cl, S, Se, Ag, B	Sb, Ca, Sr, Na, Mg, K	Ba, As, Sn, Cd, Li, Mo, Pb, Zn, Mn, U, V, Cu, P	Ni, Si, Cr, Co, Fe, Rb, Th, Al, Ti
Замедленный водообмен		Cl, S, B, Se, N*, Na, Ag	Zn, Sb, Cd, Mo, Sr	Pb, As, Sn, Ca, Ba, Cu, Mg, U, K, Mn, V, Li, Ni	Co, Fe, Cr, Si, Rb, Al, Th, P, Ti

Примечание: *азот нитратный; все элементы таблицы расположены в порядке убывания подвижности

На интенсивность водной миграции химического элемента влияет не только его кларк в литосфере (а значит степень его концентрации или рассеяния в подземных водах), условия гипергенеза (определяющие скорость водообмена) и участие элемента в гидрохимических и биохимических процессах, имеющих место в данном водосборном бассейне, но также и уровень антропогенного вмешательства.

4.4.3. Ассоциации компонентов в подземных водах бассейна р.Бодрак по данным факторного анализа

Данные о содержаниях макрокомпонентов и микроэлементов в подземных водах бассейна р. Бодрак были обработаны методом главных компонент (МГК) факторного анализа с помощью программного пакета «STATISTIKA 6.0».

Изучены две выборки: 1 – содержания макрокомпонентов и нитратов; 2 – содержания макрокомпонентов, нитратов и микроэлементов. Объем обеих выборок $n=54$; для уровня значимости $\alpha=0,05$ критическое значение факторной нагрузки $r_{0,05; 52}=0,27$. Значения факторных нагрузок приведены в таблицах 11 и 12.

Структуры полученных факторов для выборки 1 (нагрузки макрокомпонентов):

$$\begin{aligned} \text{I}_{55\%} & \frac{\text{Mg}_{99} (\text{HCO}_3)_{90} \text{Na}_{89} (\text{SO}_4)_{85} \text{Mg}_{82} \text{Cl}_{79} \text{K}_{41} \text{Ca}_{34}}{\text{---}}; \\ \text{II}_{15\%} & \frac{(\text{NO}_3)_{49} \text{Mg}_{47}}{\text{Ca}_{68} \text{K}_{62}}; \quad \text{III}_{11\%} \frac{(\text{NO}_3)_{77} \text{Ca}_{48}}{\text{Na}_{27}}. \end{aligned}$$

Структуры для выборки 2 (нагрузки макрокомпонентов, нитратов и микроэлементов):

$$\begin{aligned} \text{I}_{21\%} & \frac{\text{Mg}_{80} \text{Na}_{73} (\text{SO}_4)_{70} \text{Cl}_{68} \text{Mg}_{64} \text{Ni}_{63} (\text{HCO}_3)_{62} \text{Sr}_{59} \text{Co}_{54} \text{Cu}_{50} \text{Zn}_{50}}{\text{B}_{46} \text{Pb}_{46} \text{Cd}_{45} \text{K}_{43} \text{Fe}_{40} \text{Li}_{39} (\text{NO}_3)_{37} \text{As}_{36} \text{Ca}_{35} \text{Al}_{35} \text{Sb}_{31} \text{Cr}_{30} \text{V}_{30} \text{Sn}_{28}}; \\ \text{II}_{15\%} & \frac{\text{Zn}_{70} \text{Fe}_{68} \text{Cu}_{67} \text{Pb}_{66} \text{Ni}_{56} \text{Al}_{47} \text{Cr}_{38} \text{Si}_{38} \text{Co}_{37} \text{Cd}_{34}}{\text{Li}_{51} \text{Mg}_{51} (\text{HCO}_3)_{49} \text{Na}_{49} \text{B}_{46} (\text{SO}_4)_{43} \text{M}_{43} \text{Sn}_{32} \text{Cl}_{29}}; \\ \text{III}_{13\%} & \frac{\text{Cr}_{45} \text{V}_{42} (\text{HCO}_3)_{37} \text{Si}_{34} \text{M}_{34} \text{Mg}_{30} (\text{NO}_3)_{28}}{\text{Sb}_{85} \text{As}_{83} \text{Se}_{74} \text{Co}_{62} \text{Mo}_{43} \text{Sn}_{34} \text{Ag}_{31}}. \end{aligned}$$

Здесь римская цифра соответствует номеру фактора, число в основании этой цифры – вес фактора (Prp. Totl), над чертой выписаны все переменные, имеющие значимую положительную нагрузку на фактор, под чертой – значимую отрицательную нагрузку. Значения факторов в точках наблюдения приводятся в приложениях 9 и 10.

Первый фактор в обеих выборках имеет сходную структуру. Высокими нагрузками выделилась ассоциация макрокомпонентов (выборка 1) и ассоциация макрокомпонентов с нитратами и большим спектром микроэлементов (выборка 2). Это фактор общей минерализации подземных вод. Показатель М (минерализация) имеет наибольшую нагрузку на этот фактор. Как видно из диаграмм значений факторов в точках (рис. 24 и 25), минерализация подземных вод бассейна р.Бодрак определяется составом вмещающих отложений (на ее величину влияют все макрокомпоненты подземных вод).

Таблица 11

Факторные нагрузки макрокомпонентов, минерализации и нитратов
(подземные воды бассейна р. Бодрак, выборка 1)

Компоненты	Factor I	Factor II	Factor III
Na	-0,891560	0,073907	-0,269210
K	-0,411723	-0,617164	-0,118757
Ca	-0,342243	-0,675175	0,485326
Mg	-0,822032	0,468467	-0,174079
Cl	-0,787109	-0,129053	0,186574
SO ₄	-0,849063	-0,095668	-0,053261
HCO ₃	-0,896061	0,049838	-0,126979
Минерализация	-0,987424	0,052954	0,090486
NO ₃	-0,245349	0,489303	0,769162
Expl.Var	4,935838	1,332190	1,005990
Prp.Totl	0,548426	0,148021	0,111777

Таблица 12

Факторные нагрузки макрокомпонентов, микроэлементов, минерализации и нитратов
(подземные воды бассейна р. Бодрак, выборка 2)

	Factor I	Factor II	Factor III
Ag	-0,174539	-0,050324	-0,311739
Al	-0,348442	0,466124	-0,030351
As	-0,362956	-0,070195	-0,831181
B	-0,461986	-0,464030	-0,077805
Ba	0,055253	0,001999	0,242164
Cd	-0,449453	0,340728	-0,066738
Co	-0,535304	0,369840	-0,624521
Cr	-0,300540	0,379672	0,448589
Cu	-0,501301	0,671523	0,126320
Fe	-0,398762	0,684313	0,066049
Li	-0,391513	-0,510266	-0,260658
Mn	-0,183593	0,028316	-0,189126
Mo	-0,072255	0,184010	-0,429613
Ni	-0,636542	0,555238	-0,002906
P	-0,095132	0,184223	-0,276056
Pb	-0,455955	0,656237	-0,077139
Sb	-0,310497	-0,127070	-0,847954
Se	-0,234364	-0,063518	-0,744672
Si	-0,254936	0,376944	0,338506
Sn	-0,278745	-0,321320	-0,341980
Sr	-0,587604	0,066132	0,004604
V	-0,296160	0,090198	0,417720
Zn	-0,496581	0,705235	0,098586
NO₃	-0,371289	0,202658	0,281992
Na	-0,727792	-0,487660	0,187586
K	-0,426915	-0,202967	-0,226171
Ca	-0,350330	0,003977	-0,059120
Mg	-0,644937	-0,509043	0,302756
Cl	-0,676331	-0,287310	0,215383
SO₄	-0,702552	-0,432642	0,134239
HCO₃	-0,625358	-0,491735	0,368501
Минерализация	-0,801898	-0,431801	0,335131
Expl.Var	6,650826	4,876803	4,102999
Prp.Totl	0,207838	0,152400	0,128219

Высокие отрицательные значения этого фактора, соответствующие выделенной ассоциации, характерны для всех водных проб, связанных с отложениями нижнего структурного этажа (Т₃-J₁tv, Т₃-J₁es, J₂b), а также с аллювиальными и пролювиальными водами четвертичного водоносного горизонта, развитого на этих отложениях (участки 1 – 5, рис. 23). Все вмещающие отложения сложены песчано-глинистыми и вулканогенно-осадочными породами триаса и юры.

Как следует из структуры первого фактора выборки 2, отложения нижнего структурного этажа определяют и ассоциацию большинства микроэлементов в подземных водах указанных выше горизонтов и зон. Надо сказать, в ассоциации не участвуют Si, Se, Mn, Ag, P, Mo, Ba, причем Ba вообще не проявился в структуре факторов, а Mn «прорезался» лишь в третьем факторе в задаче только с микроэлементами. Похоже, у этих элементов нет

четко выраженных источников поступления или же эти источники имеют очень небольшой вес в общей системе (то есть они имеют низкую вариабельность в данной системе). Таким образом, ведущая роль (первый фактор) в формировании состава подземных вод бассейна р.Бодрак принадлежит песчано-глинистым и вулканогенно-осадочным породам триаса и юры.

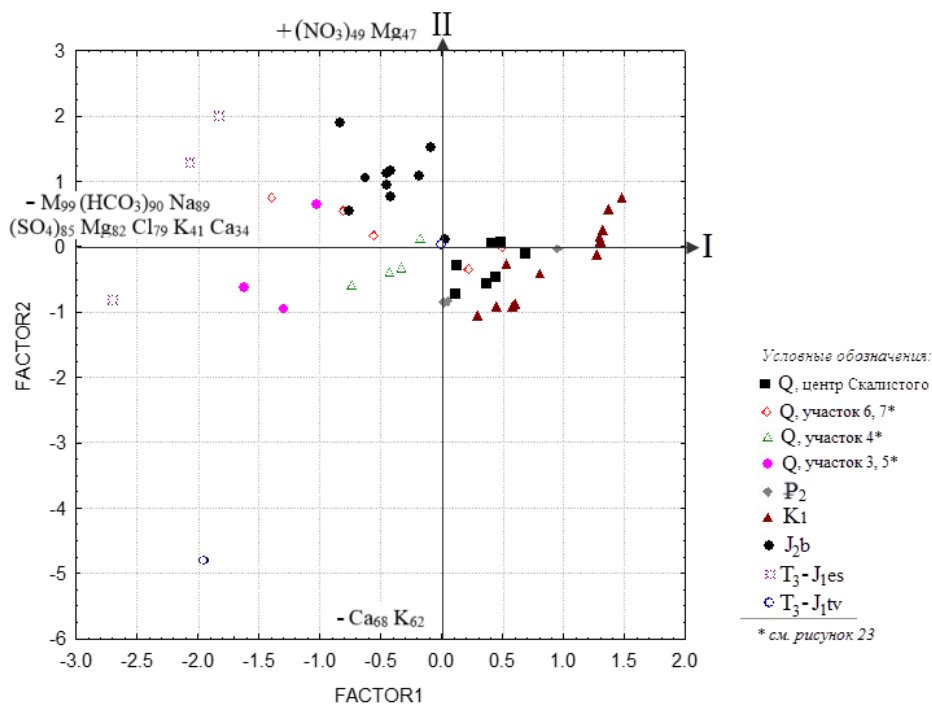


Рис. 24. Диаграмма значений I и II факторов
(выборка 1 - макрокомпоненты, минерализация и нитраты)

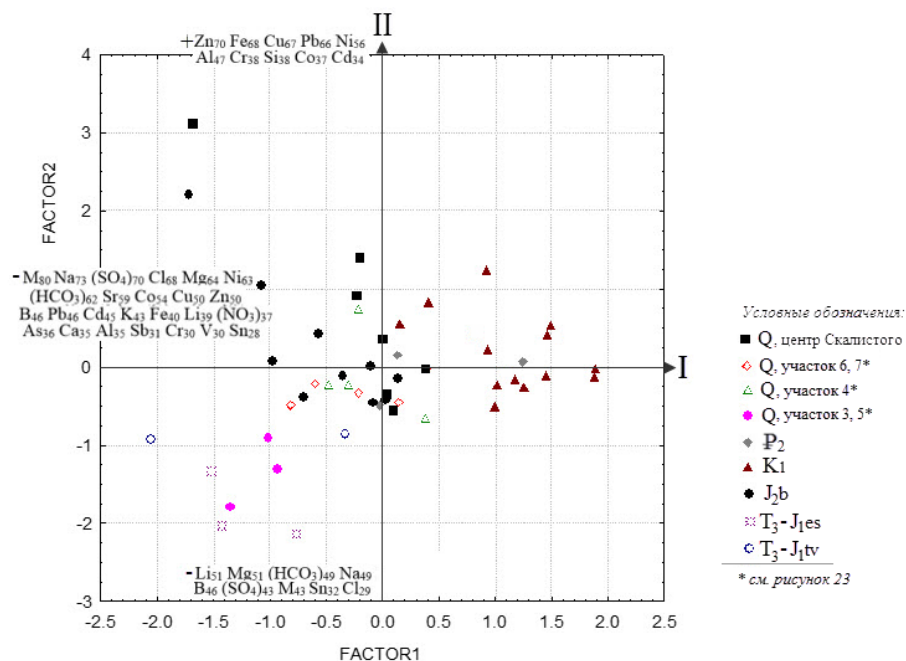


Рис.25. Диаграмма значений I и II факторов
(выборка 2 – макрокомпоненты, микроэлементы, минерализация и нитраты)

Воды карбонатных отложений мелового и палеогенового возраста характеризуются положительными или близкими к нулю значениями первого фактора. Следовательно, ассоциация макрокомпонентов и микрокомпонентов, выделенная в первом факторе, не характерна для подземных вод меловых и палеогеновых отложений. Очевидно, дисперсия компонентов выделенных в структуре I фактора, существенно ниже в водах меловых и палеогеновых карбонатных отложений; вследствие этого ассоциация компонентов этих вод не проявилась в отдельном факторе.

В структуре II и III факторов выборки 1 участвует нитрат-ион, его ассоциация с магнием во II факторе и с кальцием в III факторе может быть связана с составом вмещающих отложений. Вероятно, данные факторы характеризуют влияние антропогенных процессов на формирование состава подземных вод. Действительно, водные пробы с высокими положительными значениями этих факторов (приложение 9, рис. 11), соответствующими ассоциации с нитрат-ионом, связаны с загрязненными водами: водоносной зоны вулканогенно-осадочной толщи (центр д. Трудолюбовки), палеогеновых отложений района п. Скалистое, аллювиальных отложений нижнего и среднего течения р. Бодрак. В некоторых пробах готеривского водоносного горизонта имеются повышенные над фоном значения нитратов, объясняемые постоянным выпасом домашнего скота на этой территории.

В структуре II фактора выборки 2 с участием микроэлементов наибольшими нагрузками выделяется группа цветных и черных металлов – Zn-Fe-Cu-Pb-Ni-Al. Учитывая интерпретацию второго фактора для выборки 1, можно предположить, что эта ассоциация металлов также связана с антропогенным загрязнением. Действительно, высокими положительными нагрузками, связанными с этой ассоциацией, выделяются только пробы, отобранные в центре д. Трудолюбовка и пос. Скалистое. Таким образом, указанная ассоциация металлов в подземных водах бассейна р.Бодрак связана, очевидно, с антропогенным (техногенным) воздействием, подтверждая выводы, сделанные в главе 4.4.2.

В структуре III фактора выборки 2 высокими отрицательными нагрузками выделяется ассоциация Sb-As-Se-Co-Mo-Sn-Ag, характеризующая водные пробы таврической серии, нижнемеловых и верхнемеловых-палеогеновых известняков (приложение 10).

То есть ассоциация металлов с сурьмой и мышьяком обусловлена спецификой минерального состава вмещающих отложений, ее источником могут быть сульфиды, сульфоарсениды и сульфоантимониды. Скорей всего, данная ассоциация вызвана сульфидными конкрециями и стяжениями, которые широко распространены и в известняках, и во флишевых толщах таврической серии.

4.4.4. Этапы формирования химического состава подземных вод

В формировании подземных вод зоны гипергенеза ряд исследователей выделяют четыре этапа: атмогенный, биогенный, литогенный и испарительный [72, 73].

На изучаемой территории химический состав пресных метеорных вод области активного водообмена происходит под влиянием экзогенных процессов и определяется привнесом компонентов с атмосферными осадками и вещественным составом водовмещающих отложений. Именно с выпадения атмосферных осадков (которые являются основным источником питания подземных вод изучаемой территории) начинается формирование химического состава подземных вод [59]. Как было показано выше, минерализация атмосферных осадков в среднем примерно 40 мг/л. Сезонные изменения химического состава происходят за счет увеличения содержания преобладающих ионов HCO_3^- и Ca^{2+} .

В предгорьях Крыма в настоящий период среднее количество солей, поступающих с атмосферными осадками составляет приблизительно 250 кг/га в год. Выпадение солей с атмосферными осадками рассчитывалось по формуле [41]:

$$C_{(\text{кг/га в год})} = c_i (\text{мг/л}) * \sum_{i=1}^{12} m_i (\text{мм}) * 10^{-2}, \quad (7)$$

где c_i – среднемесячная концентрация отдельных ионов (мг/л),
 m_i – месячная сумма осадков (мм), 10^{-2} – пересчетный коэффициент.

Фильтруясь через почву, проходя через кроны деревьев и растительность, химический и газовый состав осадков претерпевает изменения (биогенный этап). Например, в атмосферных осадках, собранных под ореховым деревом содержание сульфатов в экв.% увеличилось вдвое.

Фильтрующиеся в почвенном слое атмосферные воды окисляют органические вещества, меняя свой газовый состав, при этом содержание O_2 падает, CO_2 возрастает [118]. Кислород и углекислота имеют большое значение для процессов выщелачивания. Присутствие свободного кислорода в подземных водах активного водообмена обеспечивает окислительную обстановку (Eh подземных вод бассейна р. Бодрак колеблется около +200 мВ). Двуокись углерода служит источником образования гидрокарбонатов.

Существенные изменения в химическом составе подземных вод происходят при взаимодействии воды с вмещающими горными породами (литогенный этап). Дождевые воды в зоне гипергенеза – главный агент химического выветривания горных пород. Наличие в бассейне р. Бодрак хорошо растворимых карбонатных пород, а также обогащенность карбонатным веществом терригенных пород, обеспечило преобладание в подземных водах ионов кальция и гидрокарбонат-ионов над другими ионами.

Под влиянием процессов химического выветривания происходит преобразование горных пород (образуются новые вторичные соединения), при этом идут процессы окисления, гидратации, растворения, гидролиза и т.п., в которых главенствующую роль играют природные воды. Активность химического выветривания усиливается за счет органического выветривания, которое проявляется при взаимодействии горных пород с растениями и животными, и приводит к перераспределению таких элементов как К, Р, S, Ca, Na, Mg, Fe, Al, Si и др.

Подземные воды, взаимодействуя с вмещающими породами и насыщаясь при этом растворимыми солями, стремятся достигнуть состояния равновесия с породообразующими минералами. Выявление современного состояния равновесия воды с основными породообразующими минералами – важный ключ к пониманию формирования химического состава маломинерализованных вод.

Испарительное концентрирование (испарительный этап) возможно в жаркие периоды, при этом из водного раствора могут осаждаться некоторые химические соединения и минералы, в результате чего в общем составе воды нарушаются соотношения макрокомпонентов.

Также на химический состав подземных вод активного водообмена оказывают влияние локальные притоки вод из зоны замедленного водообмена, поступающие по зонам тектонических нарушений. Когда притоки таких вод достигают значительных величин, образуются зоны с аномальным химическим составом. Такой аномальный участок с восходящей разгрузкой хлоридно-натриевых вод существует на севере д. Трудолюбовки.

Антропогенный этап формирования состава природных вод связан с хозяйственной деятельностью человека. На изучаемой территории основными загрязнителями являются азотистые соединения, концентрации которых могут достигать значений, способных вызывать метаморфизацию химического состава подземных вод.

4.4.5. Взаимодействие вода - горная порода

Современные представления о системе «вода–порода» базируются на термодинамических расчетах равновесия с горными породами и методах физико-химического моделирования. Большой вклад в развитие этих представлений сделали: В.И. Вернадский, Р.М. Гаррелс, Ч.Л. Крайст, Д.С. Коржинский, В.С. Самарина, Н.И. Толстихин, А.М. Овчинников, А.И. Коротков, В.А. Кирюхин, С.Л. Шварцев и другие.

Формирование химического состава природных вод, начавшись еще на атмогенном и биогенном этапах, продолжается на литогенном этапе в системе «вода–порода», при этом

взаимодействия воды с породами в зоне гипергенеза отличаются повышенной активностью (интенсивностью водообмена). Это обуславливает хорошую промытость вмещающих отложений, когда вынос солей преобладает над привносом. Области экзогенной трещиноватости широко развиты в районе исследования, они формируются за счет растрескивания и дробления пород вблизи поверхности земли, вызванного процессами физического выветривания (перепады сезонных и суточных температур, воздействие атмосферных осадков и т.п.).

В процессах химического выветривания в зоне гипергенеза ключевую роль играют соединения угольной кислоты, которые вместе с ионами кальция образуют карбонатно-кальциевую систему (рис. 26). Если количество растворенной углекислоты больше, чем нужно для равновесия, равновесие сдвигается вправо и это приводит к растворению CaCO_3 , если меньше – влево, когда происходит образование и выпадение карбонатов кальция.

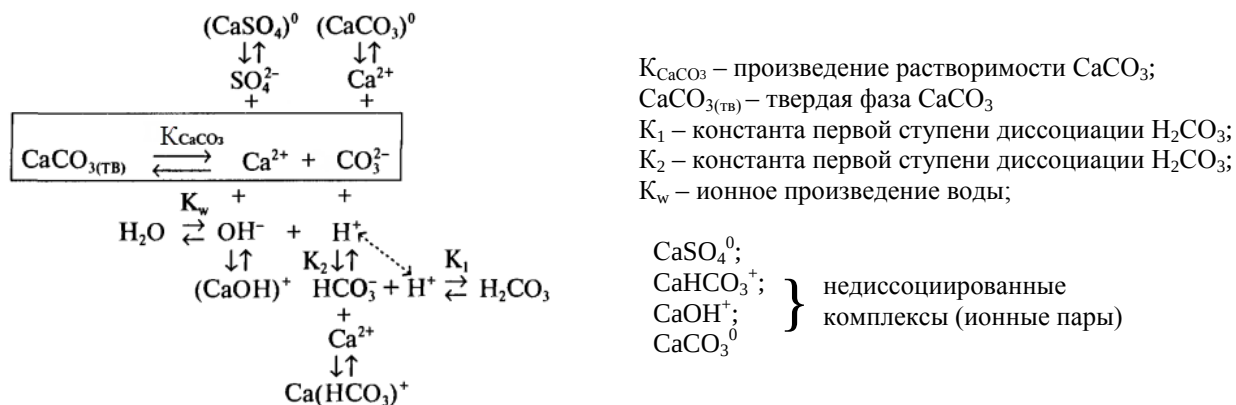
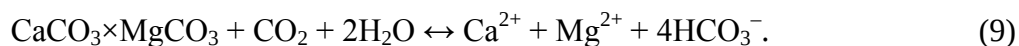
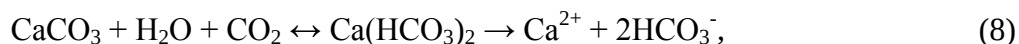


Рис. 26. Основные химические равновесия и карбонатное насыщение воды [3]

При активном участии углекислоты протекают такие широко развитые процессы в районе исследования как растворение карбонатных пород (известняков, доломитов) и выщелачивание карбонатного цемента из терригенных пород. Рассмотрим на примерах кальцита и доломита (которые представлены в пороодообразующих отложениях Горного Крыма) взаимодействие подземных вод с карбонатными минералами, идущее по реакции конгруэнтного растворения:



Углекислотное выщелачивание хорошо растворимых карбонатных пород, а также обогащенных карбонатным веществом терригенных пород, обеспечило преобладание в подземных водах бассейна р. Бодрак ионов кальция и гидрокарбонатов над другими ионами.

В настоящее время при гидрогеохимических исследованиях природных вод принято изучать существующие в системе «вода–порода» взаимодействия, суть которых состоит в том, что эта система всегда имеет равновесно-неравновесный характер [137].

Равновесие предполагает, что постоянно идет процесс растворения и осаждения с одинаковыми скоростями (то есть существует динамическое равновесие). Для оценки степени неравновесности подземных вод по отношению к минералам используется степень насыщения (или индекс неравновесности), который показывает вероятность осаждения твердой фазы из раствора. Раствор перенасыщен если $SI > 0$ и недонасыщен если $SI < 0$.

$$SI \text{ (Saturation index)} = \log Q = \log P_a/K = \log P_a - \log K, \quad (10)$$

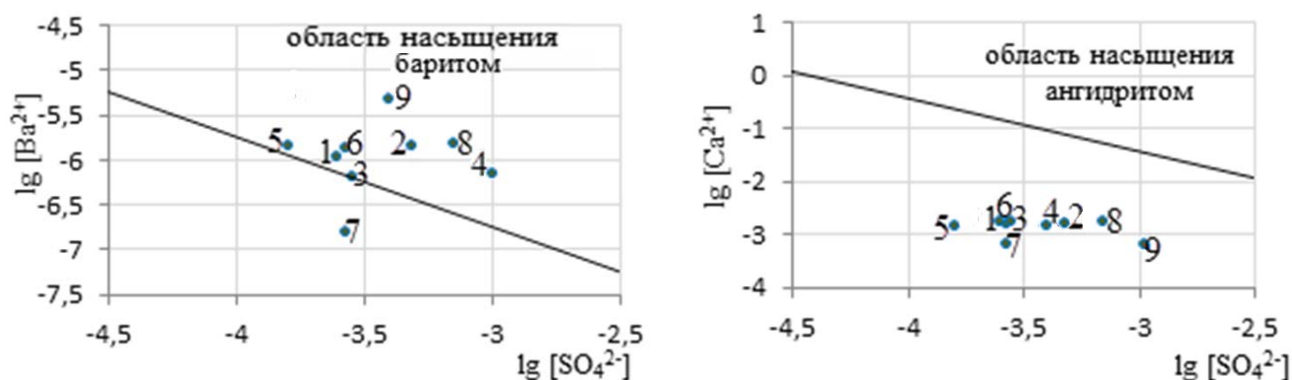
где Q – кватант реакции (отношение активностей продуктов реакции к активности исходных веществ) [10];

P_a - произведение активностей ионов; K - произведение растворимости;

$$\text{Например, для кальцита: } SI = \log \frac{(a_{Ca^{2+}} \times a_{CO_3^{2-}})_{\text{раствор}}}{K_{CaCO_3}}. \quad (11)$$

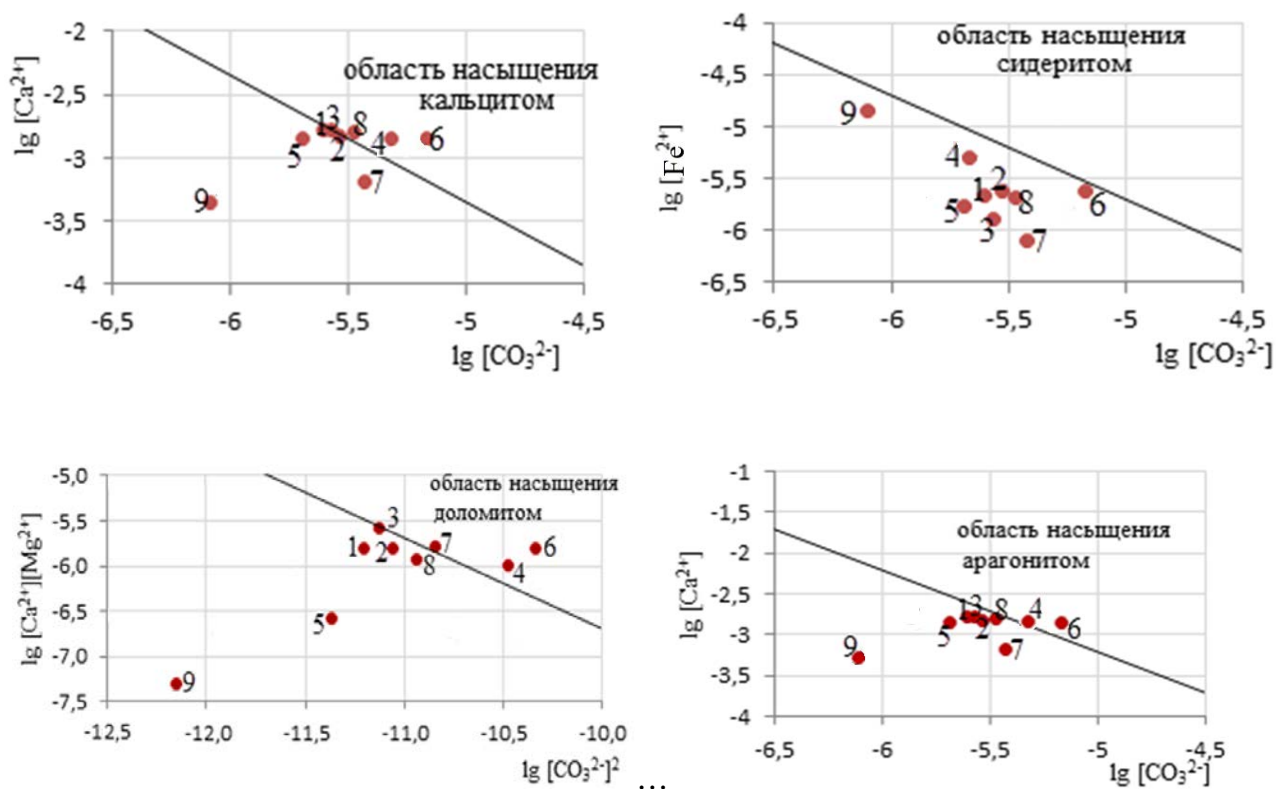
Активности компонентов были рассчитаны с использованием программного комплекса PHREEQC Interactive 2.15.0, разработанного для моделирования равновесных процессов массопереноса и процесса растворения.

На основе данных термодинамического моделирования равновесного состояния подземных вод построены диаграммы равновесий подземных вод бассейна р. Бодрак с карбонатными и сульфатными породообразующими минералами (рис. 27 и 28).



Условные обозначения: 1 – Q(уч.*6-7); 2 – Q(уч.4-5); 3 – Q (уч.1-3); 4 – P_2 ; 5 – K_1 ; 6 – J_2b ; 7 – T_3-J_{1es} ; 8 – $T_3-J_1 tv$; 9 – область замедленного водообмена
*номера участков для Q водоносного горизонта обозначены на рис.23

Рис. 27. Равновесие подземных вод с сульфатными минералами при температуре 25°C



Условные обозначения: 1 – Q(уч.*6-7); 2 – Q(уч.4-5); 3 – Q (уч.1-3); 4 – P₂; 5 – K₁; 6 – J₂b; 7 – T₃-J₁es; 8 – T₃-J₁ tv; 9 – область замедленного водообмена
*номера участков для Q водоносного горизонта обозначены на рис.23

Рис. 28. Равновесие подземных вод с карбонатными минералами при температуре 25°C

В таблице 13 представлены индексы насыщения ряда карбонатных и алюмосиликатных минералов в подземных водах бассейна р. Бодрак. Для сравнения рассчитаны индексы насыщения атмосферных осадков.

Для рассмотрения выбраны следующие, характерные для горных пород района исследования, минералы: карбонатные (кальцит, доломит, арагонит, сидерит), сульфатные (гипс, ангидрит, барит), некоторые алюмосиликаты.

Уже на атропогенном этапе атмосферные осадки насыщены такими оксидными и гидроксидными соединениями как гематит (Fe₂O₃), гетит (FeOOH), гиббсит (Al(OH)₃), Fe(OH)₃ и некоторыми глинистыми алюмосиликатами (табл. 13).

Высокая насыщенность глинистыми минералами связана с тем, что пробы атмосферных осадков отбирались исключительно в летний период времени, когда редки и непродолжительны дожди, вследствие чего воздух пересыщен пылеватыми частицами.

Таблица 13

Степени насыщения (SI) подземных вод бассейна р. Бодрак к некоторым минералам

Минерал	Формула	Активный водообмен					Замедл. водообмен	Атм. осадки
		T ₃ -J ₁ tv	T ₃ -J ₁ es	J ₂ b	K ₁	P ₂		
Hematite	Fe ₂ O ₃	16,37	14,36	15,12	15,4	15,24	16,72	16,7
K-mica	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	12,71	12,45	13,11	12,3	14,1	16,63	9,44
Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	7,06	7,21	8	7,44	8,41	9,35	5,54
CaMontmorillonite	CaO 165Al ₂ 33Si ₃ 67O ₁₀ (OH) ₂	6,14	6,12	7,42	6,47	7,78	8,87	3,34
Goethite	FeOOH	7,21	6,2	6,59	6,73	6,65	7,39	7,36
Illite	KO 6MgO 25Al ₂ 3Si ₃ 5O ₁₀ (OH) ₂	5,48	5,35	6,13	5,05	6,63	8,22	1,97
Gibbsite	Al(OH) ₃	2,65	2,76	2,91	2,87	3,2	3,66	2,54
K-feldspar	KAlSi ₃ O ₈	1,86	1,38	1,74	0,97	2,17	3,77	-1,23
Barite	BaSO ₄	1,18	-0,23	0,73	0,55	1,17	0,82	-0,32
Quartz	SiO ₂	0,49	0,45	0,71	0,47	0,63	0,63	-0,18
Aragonite	CaCO ₃	0,01	0,34	-0,24	-0,26	0,32	-0,5	-2,44
Calcite	CaCO ₃	0,16	-0,02	-0,08	-0,11	-0,16	-0,35	-2,3
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	-0,23	-0,06	0,44	-0,8	0,27	2,17	-3,75
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	-0,05	0,19	-0,34	-1,16	-0,9	-1,86	-5,19
Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	-0,58	-1,24	-0,24	-0,6	0,16	1,02	-3
Siderite	FeCO ₃	-0,34	-0,69	-0,47	-0,65	-0,5	0,15	-1,33
Rhodochrosite	MnCO ₃	-0,18	-1,79	1,5	-1,99	-1,65	2,37	-2,44
Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-1,36	-2,17	-1,83	-2,05	-1,95	-1,63	-3,64
Anhydrite	CaSO ₄	-1,61	-2,42	-2,08	-2,3	-2,21	-1,88	-3,88
Witherite	BaCO ₃	-2,7	-3,64	-2,94	-2,93	-2,46	-3,31	-4,32
Talc	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-3,54	-3,3	-3,64	-6,29	-5,11	-7,15	-10,54
Chlorite(14A)	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈	-4,5	-3,72	-4,94	-8,58	-6,55	-9,02	-13,8
Pyrite	FeS ₂	-93,72	-91,71	-90,76	-92,7	-90,82	-89,31	-94,58

Насыщенность вод по отношению к карбонатным минералам (кальциту, доломиту, сидериту) зависит от произведения растворимости согласно реакции:



Константа реакции (т.е. произведение растворимости) для чистого кальцита при 25°C и давлении в 1 атм равна $10^{-8,48}$, но с понижением температуры уменьшается [85].

При исследовании насыщения подземных вод бассейна р. Бодрак относительно ряда породообразующих минералов использовались реакции, представленные в таблице 14.

Таблица 14

Уравнения взаимодействия вод с карбонатными и сульфатными минералами и их основные термодинамические параметры

Минерал	Реакция	Логарифм константы реакции lg K _p [85]	Уравнение quotанта реакции
кальцит	$\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	-8,48	$[\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}]$
арагонит	$\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	-8,22	$[\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}]$
доломит	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$	-16,7	$[\text{Ca}^{2+}] \times [\text{Mg}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}]^2$
сидерит	$\text{FeCO}_3 = \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	-10,54	$[\text{Fe}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}]$
ангидрит	$\text{CaSO}_4 = \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	-9,28	$[\text{Ca}^{2+}] \times [\text{SO}_4^{2-}]$
барит	$\text{BaSO}_4 = \text{Ba}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	-9,74	$[\text{Ca}^{2+}] \times [\text{SO}_4^{2-}]$

На диаграммах насыщения (рис. 27 и рис. 28) линиями показаны равновесия воды с карбонатными и сульфатными минералами при температуре 25°C. Точки, расположившиеся выше линии отвечают подземным водам, насыщенным по отношению к данным минералам, ниже линии - напротив. Подземные воды, фигуративные точки которых расположены в области насыщения, способны к осаждению минералов, которыми насыщены воды.

По данным диаграмм (рис. 27), подземные воды из различных вмещающих отложений имеют неодинаковую степень насыщенности относительно доломита (часть вод насыщена по отношению к доломиту, часть – нет). Относительно сидерита подземные воды района обычно недонасыщены.

Наибольшее внимание привлекает кальцит, так как именно из него сложены известняки, вызывающие наибольший интерес как резервуары для формирования и аккумуляции водных ресурсов в Предгорьях Крыма и, в частности, в бассейне р. Бодрак. Изучение степени насыщения вод относительно кальцита показали, что подавляющая часть природных вод исследуемого района равновесна с кальцитом.

Чем больше времени вода циркулирует в горных породах (и чем меньше интенсивность водообмена), тем выше насыщение воды карбонатами кальция. Недонасыщенность относительно кальцита объясняется коротким временем взаимодействия воды с горной породой. Например, в районе исследования существуют два родника, связанных с готеривскими органогенно-обломочными известняками. Один из них расположен на северо-западном склоне г. Патиль и имеет минерализацию 40 - 50 мг/л (область питания и область разгрузки имеют высотные отметки 411 м и 330 м соответственно, то есть путь фильтрации подземных вод короткий). Другой – родник Афениз имеет минерализацию около 600 мг/л. Вода обоих родников близка к равновесию, однако в первом случае подземные воды несколько недонасыщены относительно кальцита ($SI_{CaCO_3} = - 0,06$), во втором – несколько пересыщены ($SI_{CaCO_3} = 0,07$).

Средние содержания кальция в водах родника на горе Патиль около 110 мг/л, гидрокарбонатов 370 мг/л, в водах родника Афениз – 130 мг/л и 430 мг/л соответственно, концентрации хлоридов и сульфатов невысоки и примерно одинаковы. То есть, чем длиннее путь фильтрации, тем выше минерализация воды, главным образом, за счет выщелачивания углекислых солей.

Подземные воды с минерализацией $>0,6$ г/л и $pH >7,4$, как правило, настолько насыщены карбонатом кальция, что он может высаживаться из раствора [20]. Например, у родника, выходящего в седловине между горами Большой Кермен и Малый Кермен, обнаружены травертины, по данным аналитика Е.Л. Грузовой (ВСЕГЕИ), состоящие из

чистого CaCO_3 (рис. 29). Средняя минерализация вод родника 730 мг/л, pH 8. Здесь сработал карбонатный геохимический барьер, на котором кальцит выпал из раствора:

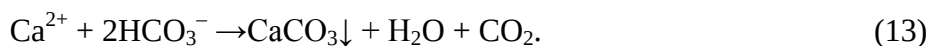
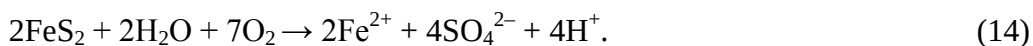
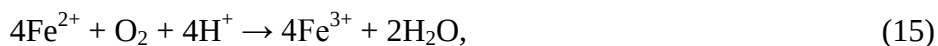


Рис. 29. Родник «Кермен» (слева), травертины (справа)

Появление сульфат-ионов в подземных водах связано с окислением сульфидов, в результате которого происходит перевод в раствор ионов Fe и обогащение воды SO_4^{2-} :



В свою очередь ион Fe^{2+} окисляется кислородом до Fe^{3+} :



который затем может осаждаться в виде различных оксидов или гидроксидов железа.

Еще С.А. Альбов в своих работах отмечал [4], что повышенные содержания сульфатов в химическом составе трещинных вод флишевых отложений таврической серии (относительно других подземных вод Горного Крыма), обязаны выветриванию серных колчеданов, не редких в таврических глинистых сланцах, а также окислению рассеянного в породе пирита и марказита.

В таблице 15 показана степень равновесия подземных вод различных водоносных зон и горизонтов бассейна р. Бодрак с основными карбонатными и некоторыми сульфатными минералами изучаемой территории. Для сравнения представлены данные термодинамического моделирования для атмосферных осадков, из которых следует, что дождевые воды недонасыщенны, но близки к равновесию с карбонатными и сульфатными минералами. Близость к равновесию можно объяснить тем, что мы располагаем лишь данным летнего периода, когда редки дожди и воздух насыщен пылеватыми частицами.

Что касается других минералов, то согласно термодинамическому моделированию, все подземные воды прошли стадии насыщения оксидами и гидроксидами Al и Fe (гематитом, гетитом, гиббситом), рядом алюмосиликатных минералов (мусковитом, каолинитом, Са-монтмориллонитом, иллитом, калиевым полевым шпатом) (табл. 13).

Таблица 15

Степень насыщения подземных и дождевых вод
по отношению к карбонатным и сульфатным минералам

		сильно ненасыщ.	слабо ненасыщ.	недонасыщ	равновесие	насыщена	слабо пересыщ
		< -2,0	-2,0 – -1,0	-1,0 – -0,2	-0,2 < 0 < 0,2	0,2 – 1,0	1,0 – 2,0
Активный водообмен	P ₂		Gypsum Anhydrite		Siderite	Aragonite Calcite Dolomite	Barite
	K ₁	Gypsum Anhydrite	Dolomite	Aragonite Siderite	Calcite	Barite	
	J _{2b}	Anhydrite	Gypsum	Dolomite Aragonite Siderite	Calcite	Barite	
	T ₃ -J ₁ es	Gypsum Anhydrite		Siderite Barite	Calcite Dolomite	Aragonite	
	T ₃ -J ₁ tv		Gypsum Anhydrite	Siderite	Calcite Dolomite Aragonite		Barite
Замедл. водообмен		Dolomite	Aragonite Anhydrite Gypsum	Calcite	Siderite		Barite

4.4.6. Вероятные формы миграции химических элементов в подземных водах

Химические элементы в природных водах нашей планеты могут мигрировать в самых разнообразных формах, что определяется широким разнообразием природных обстановок. Основные формы миграции химических элементов зависят от внутренних факторов (радиусы ионов, валентность, энергетические свойства и прочие особенности строения элементов) и внешних факторов миграции (pH, Eh среды, температура, давление, концентрация растворенного вещества, иные условия среды).

Наиболее распространенный вид водной миграции вещества является истинно-растворенная форма. Физико-химические расчеты при гидрохимических работах позволяют прогнозировать реальные процессы, идущие в подземных водах.

Изучение соотношения форм миграции тяжелых металлов имеет важное значение при оценке качества природных вод, так как токсичность определяется не общей концентрацией металла в воде, а состоянием, в котором металл обычно мигрирует. Более токсичной является та форма, которая отвечает большей биологической и химической активности металла. Гидратированные (свободные) ионы металлов обладают большей реакционной способностью и, следовательно, более токсичны [90].

К тяжелым металлам относятся более 40 элементов периодической системы Д.И. Менделеева. Это элементы с атомной массой более 50 а.е. (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Hg, Pb и др.), их отличает высокая токсичность для живых организмов в относительно низких концентрациях, а также способность к биоаккумуляции и

биомагнификации. Почти все металлы участвуют в биологических процессах; для них характерна двойственная биологическая роль: металлы как элементы, необходимые для жизни и металлы как токсиканты [28].

Среди щелочно-земельных металлов только Mg^{2+} и Ca^{2+} широко используются живыми организмами, остальные относятся к токсичным (Sr, Be, Ba). Эти элементы стремятся замещать кальций и магний в организме. Токсичность растворимых в воде веществ пропорциональна их растворимости. Например, растворимые соли бария (особенно $BaCl_2$) очень токсичны, нерастворимый $BaSO_4$ нетоксичен совершенно.

Ионы многих металлов являются эссенциальными микроэлементами, то есть жизненно необходимыми для человека: железо, медь, цинк, кобальт, никель, молибден, марганец, мышьяк, литий. Они, входя в состав ферментов, катализируют различные биохимические процессы и регулируют обмен веществ, поэтому их дефицит или избыток влияет на адаптацию организма. До 10% потребности человека в этих элементах удовлетворяется за счет растворенных в питьевой воде минералов.

Тяжелые металлы (образованные более массивными атомами), такие как Hg, Pb, Sn, Cd и др. являются токсичными для человека. Установлено, что наибольшей токсичностью обладают их металлорганические соединения (продукты метилирования), образующиеся как биологическим путем с участием определенной группы микроорганизмов, так и вследствие некоторых химических превращений, например, с участием гумусовых веществ, прежде всего фульвокислот. Металлорганические соединения Hg, Pb, Sn обладают даже большей токсичностью, чем их свободные (гидратированные) ионы [90]. Ионы данных металлов токсичны даже в небольших количествах (поскольку связывают белки живых организмов, нарушая их функции).

Для расчета наиболее вероятных миграционных форм химических элементов в подземных водах Горного Крыма использованы программы PHREEQC Interactive 2.15.0. В результате термодинамического моделирования изучены формы существования химических элементов в подземных водах различных вмещающих отложений. Формы мигрирующих элементов представлены в приложении 11 и некоторые из них – в таблице 16.

Элементы в химическом составе инфильтрационных вод, циркулирующих в породах разного вещественного состава, различаются как количественно, так и по соотношению миграционных форм (главных анионогенных и катионогенных элементов). Гидрогеохимические условия зоны гипергенеза ($pH\ 7\div7,5$; $Eh>100$, наличие свободного кислорода) определили следующие основные формы существования элементов: свободные анионы (HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) и свободные катионы (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ ,

Mn²⁺, Sr²⁺, Zn²⁺), катионные гидрокарбонатные комплексы (CaHCO₃⁺, MgHCO₃⁺, CdHCO₃⁺, FeHCO₃⁺, MnHCO₃⁺, PbHCO₃⁺, SrHCO₃⁺, ZnHCO₃⁺), катионные гидроксидные комплексы (Al(OH)²⁺, Ba(OH)⁺, Fe(OH)²⁺), фосфатные анионные комплексы (H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻), нейтральные карбонатные комплексы (MnCO₃, PbCO₃, ZnCO₃), нейтральные сульфатные комплексы (CaSO₄, BaSO₄, MgSO₄), нейтральные фосфатные (MgHPO₄, CaHPO₄), нейтральные гидроксидные комплексы (Al(OH)₃, Cu(OH)₂, Fe(OH)₃).

Таблица 16

Основные формы миграции некоторых химических элементов в подземных водах и атмосферных осадках бассейна р.Бодрак (в % от общего содержания элемента)

	Формы миграции	Активный водообмен					Замедленный водообмен	Атмосферные осадки
		T ₃ -J ₁ tv	T ₃ -J ₁ es	J ₂ b	K ₁	P ₂		
B	H ₃ BO ₃	99	99	99	99	100	99	99
	H ₂ BO ₃ ⁻	1	1	1	1	0	1	1
Ba	Ba ²⁺	88	89	90	93	92	88	98
	BaSO ₄	10	7	7	5	6	10	2
	BaOH ⁺	1	4	3	2	2	1	0
Ca	Ca ²⁺	94	91	93	95	95	94	99
	CaHCO ₃ ⁺	4	6	4	3	3	4	1
	CaSO ₄	2	3	3	2	2	2	0
Cd	Cd ²⁺	46	74	80	85	82	46	98
	CdHCO ₃ ⁺	45	16	11	9	9	45	1
	CdCl ⁺	3	7	6	3	6	3	1
	CdSO ₄	3	3	3	2	3	3	0
	CdCO ₃	3	0	0	0	0	3	0
Fe(2)	Fe ²⁺	77	56	67	71	71	77	96
	FeHCO ₃ ⁺	18	40	30	25	26	18	3
	FeCO ₃	3	3	2	2	2	3	1
	FeSO ₄	1	1	2	1	1	1	0
	FeCl ⁺	1	0	0	0	0	1	0
Li	Li ⁺	100	100	100	100	100	100	100
Mn(2)	Mn ²⁺	74	55	65	69	70	74	96
	MnHCO ₃ ⁺	16	34	26	22	22	16	3
	MnCO ₃	4	10	7	8	6	4	1
	MnSO ₄	4	1	2	1	1	4	1
	MnCl ⁺	2	0	0	0	0	2	0
Pb	PbCO ₃	76	84	83	85	82	76	59
	PbHCO ₃ ⁺	12	12	12	10	12	12	28
	Pb ⁺²	7	2	4	4	4	7	7
	Pb(CO ₃) ₂ ²⁻	2	1	1	1	1	2	5
	PbOH ⁺	1	0	0	1	1	1	1
	PbSO ₄	1	0	0	0	0	1	0
	PbCl ⁺	1	0	0	0	0	1	0
Si	H ₄ SiO ₄	100	100	100	100	100	100	100

Примечание: полный вариант таблицы в приложении 11

Основную долю в составе подземных вод бассейна р. Бодрак составляют главные катионы, главные анионы и нитраты. На катионные гидрокарбонатные комплексы в подземных водах активного водообмена приходится от 2,4 до 3,3 % от общей минерализации и 0,9% для подземных вод из области замедленного водообмена. Металлы доминирующих катионов оказались незакомплексованными более чем на 90% для Ca²⁺ и Mg²⁺ и на 100% для

Na^+ и K^+ , то есть мигрируют преимущественно в виде свободных ионов. Наибольший вклад в комплексообразование вносят карбонатные и гидрокарбонатные ионы.

Особенностью металлов с переменной степенью окисления (Cr, Mn, Mo, V и др.) является то, что их токсичность зависит и от формы нахождения в водной среде, и от степени окисления, поэтому для таких элементов следует изучать условия перехода одних валентных форм в другие [85, 91]. Так, по данным химического анализа в водах, используемых для хозяйственно-питьевых целей на севере д. Трудюлюбовки, содержания марганца 0,21 мг/л (при ПДК 0,1 мг/л). При расчете форм миграции марганца в водной среде (методом термодинамического моделирования) установлено – на ионы Mn^{2+} приходится 74%, на MnHCO_3^+ - 16%, MnCO_3 – 4%, MnSO_4 – 4%, MnCl^+ -2%. В настоящее время известно, что наибольшую токсичность проявляют свободные (гидратированные) ионы металлов и их гидроксокомплексы (лабильная фракция) [85, 89]. При этом Mn^{2+} обладает слабой способностью к комплексообразованию. То есть, к сожалению, данную воду не следует применять в питьевых целях.

По данным П.Н. Линник (основанным на результатах биотестирования) токсичность ряда поливалентных металлов чаще всего возрастает с увеличением степени их окисления.

Важность знания и прогнозирования вероятных состояний элементов в подземных водах связана еще и с тем, что многие аналитические методы, особенно колориметрические, разработаны на определенные химические состояния, в результате истинные содержания элементов в воде могут быть существенно занижены [85].

4.5. Проблемы питьевого водоснабжения бассейна р. Бодрак

4.5.1. Общая ситуация

Подземные воды в Крымском регионе являются наиважнейшим полезным ископаемым. Основное использование подземных вод – хозяйственно-питьевое водоснабжение населения, которое в сельской местности составляет 100 %. При нехватке подземных вод люди часто используют для питьевых нужд поверхностные воды. Нередко поверхностные и грунтовые воды бывают загрязнены.

Территория бассейна р. Бодрак характеризуется невысокой антропогенной нагрузкой, которая выражается, главным образом, в сельскохозяйственной деятельности, строительстве гидротехнических сооружений для накопления воды (ставков), которые отчасти нарушают гидрологический и гидрогеологический режимы территории.

В летний период на территории бассейна р. Бодрак периодически возникают проблемы, как с количеством, так и с качеством питьевых и хозяйственных вод. Существующее централизованное водоснабжение зачастую неспособно удовлетворить потребности населения, вынуждая людей пользоваться собственными колодцами и скважинами, качество воды в которых не всегда отвечает санитарным нормам.

Централизованные водозаборы обычно строятся у реки, с тем, чтобы использовать подрусловые воды – так устроены водокачки д. Трудюлюбовки и пос. Скалистое. Пос. Прохладное (а также бызы МГРИ и МГУ) получают воду за счет месторождения подземных вод, расположенного на территории Московского оврага (родник Вербочки).

На природные особенности вод в пределах населенных пунктов (повышенные жесткости воды, плохая защищенность водоносных горизонтов) накладывается антропогенное загрязнение (главным образом, нитратное). При этом устойчивое нитратное загрязнение характерно преимущественно для вод колодцев населенных пунктов – пос. Скалистое, пос. Прохладное и д. Трудюлюбовка. Съёмка на содержание нитратов в подземных водах производилась с 1998 г. по 2008 г., были выявлены очаги загрязнения. Наиболее изученными в этом отношении являются подземные воды д. Трудюлюбовки.

Сравнение ПДК химических элементов в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования с их средними содержаниями в водах изучаемого района показывает, что для ряда элементов значения ПДК достаточно высоки, и не могут служить характеристикой некоторых гидрохимических аномалий

4.5.2. Проблемы питьевого водоснабжения д. Трудюлюбовки

4.5.2.1. Качество питьевых вод центрального водоснабжения

Деревня Трудюлюбовка входит в состав Скалистовского сельского совета (бывший колхоз им. Чапаева). В селе более 170 дворов, в которых, по переписи 2001 г., проживает около 500 человек взрослого населения. В данном районе складывается непростая ситуация с питьевыми и хозяйственными водами. В летний сезон примерно 100 - 150 человек проходят геологическую полевую практику на базе Санкт-Петербургского государственного университета. Централизованное водоснабжение осуществляется водокачкой, которая располагается на правом борту р. Бодрак почти в центре деревни.

Централизованный водозабор д. Трудюлюбовка включает воду подруслового потока р. Бодрак и родникового стока, который осуществляется за счет родника (расположенного непосредственно рядом с водокачкой в левом борту реки Бодрак – Эмиров родник) и

дренажной системы Ленинградского оврага. В меженный период Эмиров родник несет на себе основную нагрузку по количеству воды поступающей в водозабор. Его минимальный дебит в различные годы составляет от 130 до 150 м³/сут. Вода пресная гидрокарбонатно-кальциевая щелочная от умеренно жесткой до жесткой:

$$M(0,5-0,7) \frac{HCO_3(71-93)}{Ca(74-77)} pH(6-7)$$

Что касается родникового стока из Ленинградского оврага, то количество воды поступающей в водокачку из этого оврага год от года сильно варьирует, что связано с вечными проблемами трубопровода. В июне 2005 г. дебит равнялся 112 м³/сут., в июле 2010 г. – 79 м³/сут. Реально воды гораздо больше, очень много ее теряется в самом овраге, устье которого всегда подтоплено. Например, 16 июня 2005 г. проводились замеры дебита р. Бодрак у водозабора д. Трудолюбовки и ниже Ленинградского оврага. По этим данным воды из Ленинградского оврага можно получить больше, по крайней мере, в 3 раза! В целом, это вода хорошего питьевого качества и, если провести необходимую реконструкцию, местный водозабор существенно повысит свои возможности.

Вода, поступающая в водозабор из дренажной системы Ленинградского оврага, пресная умеренно жесткая гидрокарбонатно-кальциевая щелочная:

$$M 0,6 \frac{HCO_3(62-93)}{Ca(75-97)} pH(6-7)$$

После развала СССР колхозные земли в Крыму были распределены между бывшими колхозниками. Ленинградский овраг, который является водной артерией для д. Трудолюбовки, достался трем собственникам. Летом 20011 г. в устье оврага появилась запруда, на рис. 30 показан ручей ее питающий. И это в то время, когда жители деревни получали воду из централизованного водозабора полчаса утром и полчаса вечером, а р. Бодрак полностью пересохла, то есть воды катастрофически не хватало!



Рис. 30. 26 июня 2011 г.: устье Ленинградского оврага (слева), р. Бодрак (справа)

Летом 2010 г. общий дебит родниковых вод, поступающих в приемный колодец водозабора составил примерно $200 \text{ м}^3/\text{сут.}$, однако не вся эта вода попадает к потребителю. Часть воды теряется уже на водозаборе (около 50 м^3), а часть при транспортировке (старые трубы постоянно лопаются).

В зимний сезон жители деревни Трудюлюбовки не испытывают проблем с водой в отличие от летнего. Обычно воду качают два раза в сутки в течение 1 часа, именно столько воды вмещает накопительный резервуар водозабора. Безусловно, централизованный водозабор нуждается в реконструкции. Маленький объем накопительного резервуара и ветхое состояние сооружений, обеспечивающих работу центрального водоснабжения, является серьезной проблемой. На современном этапе водозабор д. Трудюлюбовки принадлежит частному предприятию, которое не заинтересовано вкладывать дополнительные средства на реконструкцию.

Химический состав воды централизованного водозабора имеет сезонные колебания. Обычно сильные ливни, несущие большое количество взвешенных частиц приводят к тому, что вода не соответствует санитарным нормативам по цветности, мутности и пр. В длительные бездождевые жаркие периоды возможны несоответствия в эпидемическом отношении (из-за ветхости водопроводных конструкций).

Что касается микрокомпонентов, природной особенностью питьевых вод центрального водоснабжения являются постоянные превышения нормативов по бария, ПДК которого $0,1 \text{ мг/л}$ согласно СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества».

Однако, в гигиенических нормативах ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования», утвержденных постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 30 апреля 2003 г. № 78, предельно-допустимые концентрации бария установлены на уровне $0,7 \text{ мг/л}$. Данные гигиенические нормативы распространяются на воду подземных и поверхностных водоисточников, используемых для питьевых целей в централизованном и нецентрализованном водоснабжении населения [159] и в таком случае содержания бария в воде вписывается в стандарты.

Такая же предельная величина для бария ($0,7 \text{ мг/л}$) рекомендована Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ).

В отдельные периоды отмечены превышения предельно допустимых концентраций по железу (согласно СанПиН 2.1.4.1074-01), с максимальным значением $1,7 \text{ мг/л}$ (19.06.2005), что вероятно связано с антропогенным загрязнением.

В таблице 17 приведены данные химического состава воды центрального водоснабжения д. Трудюлюбовки на 17.07.2010 и отдельно вод, при смешении которых формируются питьевые воды для водоснабжения жителей деревни. Также представлены содержания микрокомпонентов р. Бодрак (у водозабора), поскольку в отдельных случаях летнего периода эту воду также используют в хозяйственно-питьевых целях. Опробование всех вод на микрокомпоненты (представленных в таблице 17) проводилось в один день 17.07.2010, анализ выполнен в лаборатории ВСЕГЕИ.

Таблица 17

Качество питьевых вод, используемых в централизованном водоснабжении д. Трудюлюбовки

Хим. элемент	Централизованный водопровод	Родник Эмиров	Система Ленингр.овр.	Река Бодрак	ПДК	ЛПВ	Класс опасности
Ag	0,0001	0,00016	0,00025	0,000011	0,05	с.-т.	2
Al	0,007	0,0029	0,00473	0,00222	0,5	с.-т.	2
Au	5,90E-06	0,000014	0,000006	0,00001	не нормируется		
Ba	0,25	0,258	0,496	0,0796	0,1 (0,7)*	с.-т.	2
Co	0,000084	0,000088	0,000081	0,000083	0,1	с.-т.	2
Cr	0,012	0,0148	0,0116	0,0128	0,5	орг.	3
Cu	0,00075	0,00068	0,00124	0,00131	1	орг.	3
Fe	0,169	0,197	0,163	0,185	0,3	орг.	3
Hg	0,000031	0,000015	0,00025	0,000045	0,0005	с.-т.	1
Mn	0,00011	0,00023	0,00018	0,00011	0,1	орг.	3
Mo	0,00036	0,00039	0,00043	0,00046	0,25	с.-т.	2
Nb	0,000016	0,00004	0,000017	0,000028	0,01	с.-т.	2
Ni	0,00183	0,00242	0,00177	0,00225	0,1	орг.	3
P_{общ}	0,0111	0,0107	0,0111	0,0122	не нормируется		
Pb	0,00001	<	<	0,000007	0,03	с.-т.	2
Rb	0,00063	0,00051	0,0008	0,00043	0,1	с.-т.	2
Sb	0,00014	0,00011	0,00016	0,000098	0,05	с.-т.	2
Si	2,13	2,14	2,59	1,98	10	с.-т.	2
Sr	0,897	0,854	1,24	0,766	7	с.-т.	2
Te	0,000047	0,000023	0,000049	<	0,01	с.-т.	2
Ti	0,0342	0,0438	0,0287	0,0361	0,1	орг.	3
Tl	<	0,000002	0,000001	<	0,0001	с.-т.	2
U	0,00042	0,00038	0,0003	0,00035	0,015	с.-т.	1
V	0,00068	0,00066	0,00106	0,00082	0,1	орг.	3
W	0,00086	0,00208	0,00124	0,00182	0,05	с.-т.	2
Zn	0,00049	0,00062	0,00129	0,00081	5	орг.	3
NO₃		3,8		7,0	45	орг.	3
Жестк.		6,0		5,8	7 (10)**		
М-я		562			1000		

*согласно ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования»;

**по постановлению главного государственного санитарного врача по соответствующей территории для конкретной системы водоснабжения норматив может быть увеличен.

Как можно заметить (табл. 17), содержание всех микрокомпонентов (кроме фосфора) ниже ПДК. Выполним вычисления, рекомендуемые СанПиН 2.1.4.1074.01 для химических веществ, относящихся к 1 и 2 классам опасности:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1, \quad (16)$$

где C_i – концентрации компонентов с одинаковым лимитирующим показателем вредности (ЛПВ); ПДК_i – предельно-допустимые концентрации согласно СанПиН 2.1.4.1074.01; n – количество компонентов с одинаковым ЛПВ.

Сумма отношений концентраций, обнаруженных в воде компонентов, к величинам их ПДК не должна быть больше 1 для веществ с однотипным механизмом токсического действия, чтобы избежать усиливающего действия - эффекта суммации.

В соответствии с приложением 6 Методических указаний по внедрению и применению Санитарных правил и норм СанПиН 2.1.4.559-96 (МУ 2.1.4.682-97) принцип суммации применяют для веществ с однотипным механизмом токсического действия. Например, Al, As, Hg, Pb, CN в совокупности способны при повышенных содержаниях в водах, поражать центральную нервную систему; Ba, V, Hg в совокупности отрицательно влияют на репродуктивную функцию организма; Cd, Hg, Cr в совокупности оказывают токсикологическое действие на почки.

В нашем случае такой расчет проведен для стронция и бария, которые являются нервными и мышечными ядами, обладающими значительной общей токсичностью, а также Ba и V, которые в совокупности отрицательно влияют на репродуктивную функцию организма. Для всех вод из таблицы 17 (при использовании средних данных) показатель токсичности оказался <1 .

Вода из централизованного водозабора большую часть года обычно соответствует нормативам качества по обобщенным показателям и по макрокомпонентам согласно действующему в России СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества».

В отдельных случаях в водах центрального водоснабжения отмечались превышения по жесткости (обычно в периоды жаркой погоды), превышения по мутности (в периоды дождей) и по микробиологическим показателям. За микробиологическим состоянием следят службы Бахчисарайской санитарной эпидемиологической станции. Перед подачей потребителю воду хлорируют. Из набора изученных микрокомпонентов концентрации на порядок выше ПДК имеет фосфор, что является гидрохимической особенностью района.

4.5.2.2. Качество питьевых вод нецентрализованного водоснабжения

Во многих домах местных жителей имеются колодцы и скважины, используемые для хозяйственных и питьевых нужд, которые особенно востребованны в летний период, когда воды из центрального водоснабжения на всех не хватает и когда требуется дополнительная вода на сельское хозяйство.

Вода из личных колодцев и скважин по ряду показателей (жесткость, минерализация) часто не соответствует нормам качества для питьевых вод согласно СанПиН 2.1.4.1074-01; в отдельных пробах наблюдаются эпизодические превышения (до 2-3 ПДК) содержаний Fe, B, Li, Mn, Al, Ag, Ba.

Наиболее серьезные проблемы с качеством воды на изучаемой территории связаны с нитратным загрязнением. В водоносной зоне вулканогенно-осадочной толщи байосского яруса существует устойчивое нитратное загрязнение (рис. 31), обусловленное хозяйственной деятельностью населения, отсутствием канализации и незащищенностью водоносного слоя. В подземных водах аллювиальных отложений р. Бодрак с некоторой периодичностью отмечаются очаги нитратного загрязнения, но концентрации нитратов здесь, хотя и превышают ПДК, в целом ниже, чем в колодцах центра д. Трудолюбовка. Концентрации нитратов в подземных водах вулканогенно-осадочной толщи могут достигать 250 мг/л.

В очагах нитратного загрязнения в единичных пробах кроме нитратов были определены повышенные значения нитритов и аммония, что подтверждает постоянное поступление азотистых загрязнителей в подземные воды. По степени токсичности формы азота, растворенные в воде, располагаются следующим образом: $\text{NO}_2^- > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^-$.

В рамках исследования качества природных вод Горного Крыма проведена интегральная оценка экологического состояния подземных вод бассейна р. Бодрак с применением индекса загрязнения воды (ИЗВ) [69, 101]:

$$\text{ИЗВ} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}}{n}, \quad (17)$$

где C_i – концентрация i -го компонента или значение параметра (минерализация, жесткость); n – число показателей, используемых для расчета индекса; ПДК_i – значение ПДК i -го компонента или параметра для соответствующего водного объекта.

В расчет ИЗВ вошли: минерализация, жесткость, содержания нитратов, железа, алюминия. Выделены три класса качества: 1-очень чистые (ИЗВ < 0,3), 2-чистые (ИЗВ 0,3 – 1,0), 3-умеренно-загрязненные (ИЗВ > 1,0) (рис. 31).

Поскольку химический состав подземных и поверхностных вод рассматриваемой территории достаточно близок, так как изучаемая территория находится в области активного водообмена, расчет ИЗВ применялся как для поверхностных, так и для подземных вод с использованием одинаковых показателей и компонентов. Согласно этим расчетам (рис. 31) водоносная зона центра д. Трудолюбовки относится к умеренно загрязненной.

Более высокие содержания азотистых соединений в колодцах, приуроченных к зоне экзогенной трещиноватости, объясняются их глубоким заложением и меньшей степенью промываемости, в отличие от аллювиального водоносного горизонта, в котором колодцы неглубокого заложения регулярно промываются паводковыми и дождевыми водами. Нитратное загрязнение вызывает процессы метаморфизации химического состава подземных вод в водоносной зоне вулканогенно-осадочной толщи, образуя нитратно-гидрокарбонатные натриево-магниевые-кальциевые воды [151]:

$$M(1-1,5) \frac{HCO_3(62-73) NO_3(16-20)}{Ca(40-50) Mg(36-48) Na(12-30)} pH(6-8)$$

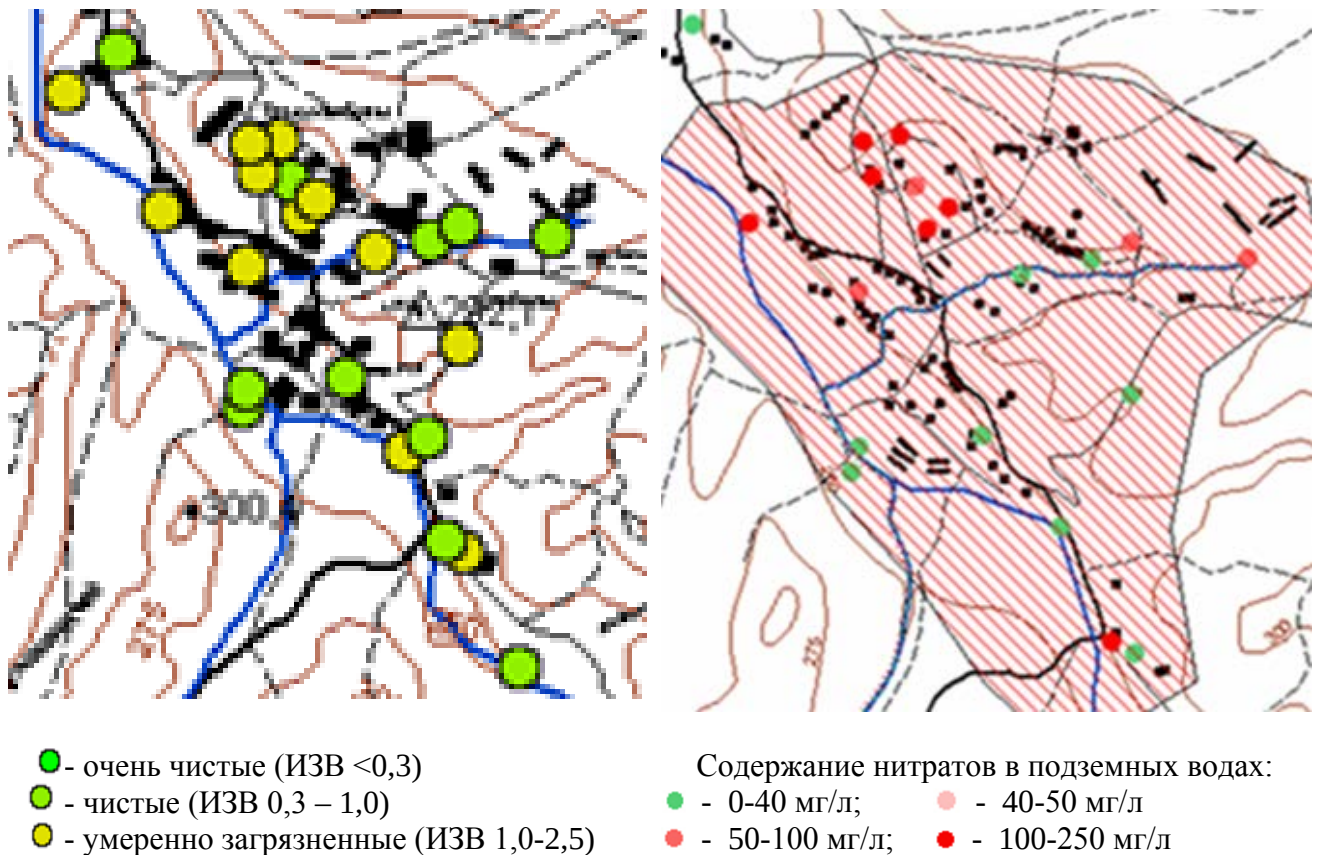


Рис. 31. Загрязнение подземных вод центра д. Трудолюбовки (М.А.Цыпин, А.Н.Шумигина, М.В.Чарыкова, Е.П.Каюкова, К.А. Волин, 2006) [141]

В таблице 18 показаны существующие и возможные превышения ряда нормируемых в воде компонентов в различных водоносных горизонтах и зонах. Там же указаны основные миграционные формы этих компонентов, полученные с помощью термодинамического моделирования [50].

Таблица 18

Качество подземных вод бассейна р. Бодрак

	Возраст вмещающих отложений	Элементы на уровне ПДК	Элементы превышают ПДК	Единично превышают ПДК	Основные миграционные формы (в % от общего содержания элемента)
Активный водообмен	Q	Fe, NO ₃	Ba, Si	B	NO ₃ ⁻ (100%), Fe(OH) ₂ ⁺ (55%), Fe(OH) ₃ (45%), Ba ²⁺ (87%), BaSO ₄ (10%), B(OH) ₃ (99%), H ₄ SiO ₄ (100%)
	P ₂	Fe	NO ₃ , Ba	Al	Fe(OH) ₃ (67%), Fe(OH) ₂ ⁺ (33%), NO ₃ ⁻ (100%), Ba ²⁺ (92%), BaSO ₄ (6%), Al(OH) ₄ ⁻ (85%), Al(OH) ₂ ⁺ (10%)
	K ₁		Ba	Al, Si	Ba ²⁺ (93%), BaSO ₄ (5%), H ₄ SiO ₄ (100%) Al(OH) ₄ ⁻ (90%), Al(OH) ₂ ⁺ (6%)
	J _{2b}	Fe, Si	NO ₃ , Ba	Al, B Mn	Fe(OH) ₂ ⁺ (61%), Fe(OH) ₃ (39%), H ₄ SiO ₄ (100%), Ba ²⁺ (90%), BaSO ₄ (7%), B(OH) ₃ (99%), NO ₃ ⁻ (100%), Al(OH) ₄ ⁻ (85%), Al(OH) ₂ ⁺ (9%), Mn ²⁺ (65%), MnHCO ₃ ⁺ (26%), MnCO ₃ (7%)
	T ₃ -J _{1es}	B	Li		Li ⁺ (100%), H ₃ BO ₃ (99%)
	T ₃ -J _{1 tv}	Fe	Mn, Ba		Fe(OH) ₂ ⁺ (63%), Fe(OH) ₃ (37%), Ba ²⁺ (88%), BaSO ₄ (10%), Mn ²⁺ (74%), MnHCO ₃ ⁺ (16%)
Замедленный водообмен		Cd, Se	B, Fe, Mn, Al	Pb	B(OH) ₃ (99%), Fe ²⁺ (77%), FeHCO ₃ ⁺ (18%), Mn ²⁺ (74%), MnHCO ₃ ⁺ (16%), Cd ²⁺ (46%), CdHCO ₃ ⁺ (45%), SeO ₃ ²⁻ (58%), HSeO ₃ ⁻ (42%), Al(OH) ₄ ⁻ (85%), Al(OH) ₂ ⁺ (10%), PbCO ₃ (76%), PbHCO ₃ ⁺ (12%), Pb ²⁺ (7%)

Примечание: ПДК Ba 0,1 мг/л

Наиболее интенсивно в водах мигрируют N, Se, B, Sr Sb, Fe. Повышенные концентрации Ba, B, Ag, Sr, Sn является геохимической особенностью территории. Выявлены притоки мягких солоноватых хлоридно-натриевых вод из области затрудненного водообмена, выделяющиеся аномальным составом микрокомпонентов. Повышенные концентрации ряда металлов (Cd, Mn, Pb) в химическом составе подземных вод бассейна р. Бодрак представлены высокотоксичными гидратированными (свободными) ионами и карбонатными комплексами. Барий примерно на 90% мигрирует в виде катионов Ba²⁺, которые являются токсичным веществом и на 7-10% как нетоксичный BaSO₄. Миграционные формы Al и Fe токсичностью не обладают; литий в подземных водах находится в виде токсичных катионов (Li⁺); нитрат-анион, содержащий атом азота в максимальной степени окисления «+5», высокотоксичен. Бор, представлен в виде ортоборной кислоты H₃BO₃, которая относится к сильнодействующим токсичным веществам с политропным действием.

4.5.2.3. Комплекс мер по улучшению централизованного водоснабжения

На современном этапе необходимо безотлагательно провести реконструкцию существующей водозаборной системы д. Трудюбовки. Огромные количества воды хорошего качества теряются, не дойдя до потребителя. Давно назрела необходимость увеличить накопительный резервуар водозабора. Необходимо разобраться с отведением воды, формирующейся в Ленинградском овраге, в пруд для личного пользования.

За последние годы формирование подземных вод в Ленинградском овраге заметно уменьшилось, что связано с уничтожением садов. Кроны деревьев создавали микроклимат, защищающий неглубокозалегающие воды от испарения. Для увеличения формирования водных ресурсов необходимо восстановить сад в Ленинградском овраге и ставок для накопления паводковых вод.

Улучшение санитарно-технического обслуживания и содержания водозабора следующий важный этап в модернизации водоснабжения д. Трудюбовки, для реализации которого в Ленинградском овраге необходимо создать зону санитарной охраны. В настоящее время на водосборной площади водозабора осуществляется выпас скота.

Необходимо провести ремонт (а лучше замену) распределительной системы центрального водоснабжения, и что особенно важно установить качественные приборы контроля и лимиты на воду, используемую для полива. Местные жители, живущие близко от водозабора, получают больше воды и тратят ее на поливы, зачастую другим жителям не хватает воды для питья. Экономия и рациональное расходование водных ресурсов, а также честное и бережное отношение к потреблению питьевых вод – важный шаг в повышении качества водоснабжения.

Необходимо вести мониторинг качества питьевых вод, особенно в летний период времени, когда возможно попадание в питьевые воды различных болезнетворных микробов и вирусов, а при необходимости проводить обеззараживание путем хлорирования.

Важным шагом станет разработка системы оборотного водоснабжения для всех жителей д. Трудюбовки, так как в настоящее время оно существует только на базе Санкт-Петербургского университета. Все это поможет сохранить и разумно использовать имеющиеся водные ресурсы.

В довершение, улучшить обеспеченность пресными водами население д. Трудюбовки можно повысив культуру водопользования, когда экономия, бережное отношение и современные технологии (капельное орошение, оборотное водоснабжение, канализация и пр.) сохраняют и преумножат природные запасы пресных вод.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

1. Атмосферные осадки Второй гряды Крымских гор по химическому составу отвечают осадкам характерным для континентального климата с минерализацией около 40 мг/л при преобладании HCO_3^- и Ca^{2+} ; по кислотности осадки околонеутральны (как в незагрязненных районах). Все макрокомпоненты хорошо коррелируются с минерализацией, но наибольшие коэффициенты корреляции имеют катионы жесткости и гидрокарбонаты.

2. Поверхностные воды Второй гряды Крымских гор по химическому составу сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые (в зависимости от режима осадков концентрации Mg могут превышать концентрации Ca). В районах развития преимущественно флишевых отложений (в алевролитовых толщах которых встречаются сидеритовые конкреции и пирит) наблюдаются повышенные содержания Mg и SO_4 .

3. Подземные воды активного водообмена вписываются в нормальную широтную географическую зональность, соответствуя зоне гидрокарбонатно-кальциевых вод горных областей Крыма и Кавказа. Химический состав подземных вод формируется под действием природных и антропогенных факторов, определяясь в первую очередь характером вмещающих отложений (ведущая роль принадлежит песчано-глинистым и вулканогенно-осадочным породам триаса и юры). Преобладают обычно HCO_3^- и Ca^{2+} , однако в водах, связанных с областью интенсивных тектонических преобразований (эскиардинская серия, $\text{T}_3\text{-J}_1\text{es}$) на первое место в катионном составе выходит Mg. В притоках подземных вод из области замедленного водообмена преобладают Na^+ и Cl^- .

4. Путем построения полиномиальных регрессионных кривых выделено три гидрохимические генерации подземных вод области активного водообмена: $< 1 \text{ г/л}$ ($\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$; $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$); в интервале 1,1 – 1,7 мг/л (преобладают HCO_3^- при смешанном катионном составе); $> 2 \text{ г/л}$ ($\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$; $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$).

5. Геохимическая особенность подземных вод территории - повышенные концентрации микрокомпонентов Ba, B, Ag, Sr, Sn. Особый вклад в ряды геохимических ассоциаций микрокомпонентов подземных вод вносят: флишевые отложения (Mn – Se); породы из области меланжа (Li – Rb); вулканогенно-осадочная толща (V).

6. Для основных ионов подземных вод активного водообмена характерна высокая интенсивность водной миграции. Очень сильной водной миграцией владеют следующие

биофильные элементы - N, Cl, S, B, Se ($K_x > 10$). Сильными мигрантами ($K_x > 1$) являются основные катионы (Ca, Na, Mg) и элементы Sr, Sb. Наиболее низкая интенсивность водной миграции свойственна таким микроэлементам как Al, Th, Fe, Co, Cr, Rb, Ti.

7. В подземных водах таврической серии, меловых и палеогеновых отложений выделена ассоциация микрокомпонентов (Sb-As-Se-Co-Mo-Sn-Ag), обусловленная спецификой минерального состава вмещающих отложений.

8. Выделена ассоциация металлов Zn-Fe-Cu-Pb-Ni-Al связанная с антропогенным загрязнением на основе анализа индексов концентраций и данным факторного анализа (высокие положительные нагрузки в водах дер. Трудлюбовка и пос. Скалистое).

9. Установлена степень равновесия подземных вод с карбонатными и сульфатными минералами. Практически все подземные воды активного водообмена бассейна р.Бодрак равновесны с кальцитом, неодинаковую степень насыщенности относительно доломита имеют подземные воды из различных вмещающих отложений; относительно сидерита подземные воды района обычно недонасыщены. Все подземные воды прошли стадии насыщения оксидами и гидроксидами Al и Fe (гематитом, гетитом, гиббситом), рядом алюмосиликатных минералов (мусковитом, каолинитом, Са-монтмориллонитом, иллитом, калиевым полевым шпатом)

10. Гидрогеохимические условия зоны гипергенеза определили следующие наиболее вероятных миграционных форм химических элементов в подземных водах Горного Крыма: свободные анионы (HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) и свободные катионы (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ , Mn^{2+} , Sr^{2+} , Zn^{2+}), катионные гидрокарбонатные комплексы (CaHCO_3^+ , MgHCO_3^+ , CdHCO_3^+ , FeHCO_3^+ , MnHCO_3^+ , PbHCO_3^+ , SrHCO_3^+ , ZnHCO_3^+), катионные гидроксидные комплексы ($\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Ba}(\text{OH})^+$, $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$), фосфатные анионные комплексы (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}), нейтральные карбонатные комплексы (MnCO_3 , PbCO_3 , ZnCO_3), нейтральные сульфатные комплексы (CaSO_4 , BaSO_4 , MgSO_4), нейтральные фосфатные (MgHPO_4 , CaHPO_4), нейтральные гидроксидные комплексы ($\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Cu}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$).

11. Основные содержания в весовом составе подземных вод активного водообмена бассейна р. Бодрак приходятся на главные анионы - HCO_3^- (46-55,3%), Cl^- (4-5,7%), SO_4^{2-} (3,8-4,6%), NO_3^- (0,3-13,7%) и катионы - Ca^{2+} (3,6-16,8%), Mg^{2+} (1,4-8,9%), K^+ (0,4-0,9%), Na^+ (2,6-9,9%). На катионные гидрокарбонатные комплексы приходится от 2,4 до 3,3 весовых %. Металлы доминирующих катионов незакомплексованы более чем на 90% для Ca^{2+} и Mg^{2+} , на 100% для Na^+ и K^+ (мигрируют, главным образом, в ионно-растворенном виде). Наибольший вклад в комплексообразование вносят карбонатные и гидрокарбонатные ионы.

12. Выявлен участок устойчивого нитратного загрязнения (2-4 ПДК) в зоне экзогенной трещиноватости вулканогенно-осадочной толщи (центр д. Трудолюбовки), отмечены явления антропогенной метаморфизации подземных вод.

13. Вода централизованного водозабора д. Трудолюбовки соответствует нормам качества по обобщенным показателям и другим компонентам согласно СанПиН 1074-01, исключая барий и железо, концентрации, которых в отдельные периоды могут превышать ПДК. Повышенное содержание бария в подземных водах - гидрохимическая особенность района.

14. В подземных водах северо-западной части д. Трудолюбовки на участке с притоками солоноватых хлоридно-натриевых вод из области замедленного водообмена выявлены повышенные ПДК (относительно СанПиН 1074-01) ряда микрокомпонентов: Al, B, Mn, Fe.

15. Повышенные концентрации ряда металлов (Cd, Mn, Pb) в химическом составе подземных вод района, используемых в хозяйственно-питьевых целях, представлены высокотоксичными гидратированными (свободными) ионами и карбонатными комплексами. Барий примерно на 90% мигрирует в виде катионов Ba^{2+} , которые являются токсичным веществом; миграционные формы Al и Fe не токсичны; нитрат-анион высокотоксичен; бор представлен токсичной кислотой H_3BO_3 .

16. Для улучшения работы водохозяйственного комплекса необходимо реконструировать водозабор д. Трудолюбовки и распределительные сети; увеличить накопительный резервуар; создать условия для сбора подземного стока - наиболее ценного источника пресных водных ресурсов – в Ленинградском овраге; установить контроль за эксплуатацией водных ресурсов; создать равные условия для доступа жителей к источнику центрального водоснабжения; организовать зону санитарной охраны; вести мониторинг режима и качества водных ресурсов; проводить разъяснительную работу среди населения о качестве подземных вод, используемых в питьевых целях.

Глава 5. ИЗОТОПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД ГОРНОГО КРЫМА

5.1. Общие сведения

Исследования природных явлений и процессов на основе изучения изотопного состава химических элементов в природных водах опираются на допущение, что первозданный изотопный состав любого химического элемента является природной константой, который в результате природных физико-химических процессов в течение геологической истории Земли претерпевает изменения [119, 129, 130].

Стабильные изотопы водорода и кислорода ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) в атмосферных осадках ведут себя достаточно предсказуемо. Повсеместно для интерпретации изотопных данных используется линия Крейга - глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ) [103, 129-132, 148]:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10. \quad (18)$$

Изотопные данные выражены в относительных единицах:

$$\delta X (\text{‰}) = (R_{\text{пр}}/R_{\text{ст}} - 1) \times 1000, \quad (19)$$

где R – атомные отношения изотопов - водорода ($^2\text{H}/^1\text{H}$) или кислорода ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) в пробе и стандарте; δ – отношение стабильных изотопов относительно стандарта выражается в промилле (‰ - тысячная доля числа), δ показывает, насколько проба обеднена ($\delta < 0$) или обогащена ($\delta > 0$) тяжелым изотопом в сравнении со стандартом ($\delta = 0$).

Например, если $\delta^{18}\text{O} = +10$, это значит, что изучаемая вода обогащена изотопом $\delta^{18}\text{O}$ относительно стандарта на 1‰. Для эталона принято: $\delta^2\text{H} = 0\text{‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$.

Зависимость $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ подземных вод отражает процессы фракционирования (разделения) изотопов при фазовых переходах, которые проявляются в природном круговороте воды вследствие испарения и конденсации воды, растворения и осаждения веществ, взаимодействия с вмещающими породами и т.п.

Круговорот воды поддерживает постоянство изотопного состава метеорных и поверхностных вод Земли в зависимости от географической широты, высоты и среднегодовой температуры местности. Концентрация тяжелых изотопов водорода и кислорода в атмосферных осадках зависит от температуры конденсации и варьирует в широких пределах, при этом в снеге меньше тяжелых изотопов, чем в дожде [130, 139].

Концентрации стабильных изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках имеют сезонные вариации и обуславливаются среднегодовыми температурами воздуха. Контроль соотношения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ на различных этапах круговорота воды дает возможность отслеживать пути фильтрации природных вод, длительность их подземной циркуляции, источники пополнения подземных вод.

Существует взаимосвязь изотопного состава атмосферных осадков с такими параметрами как широта, долгота, удаленность от побережья, высота над уровнем моря (концентрации водорода и кислорода в метеорных водах уменьшаются с повышением широты и абсолютных отметок местности). В горных районах с использованием стабильных изотопов оценивают высотные отметки областей питания, сезон пополнения запасов подземных вод и т.п. [130].

В начале 1950-х гг. (до испытаний термоядерных бомб) содержания трития в природе было почти постоянным – его естественное образование компенсировалось радиоактивным распадом. Тритий - мягкий бета-излучающий изотоп - имеет период полураспада 12,32 г. Равновесное количество космогенного трития на Земле составляет 3 - 10 кг [130]. Мощным источником поступления трития в атмосферу явились термоядерные испытания, начатые в 1952 г., а также деятельность АЭС и предприятий по переработке ядерного топлива.

В гидрогеологическом цикле источником трития являются верхние слои атмосферы (стратосфера), где происходит накопление и широтное распределение трития в глобальном масштабе. Из стратосферы осуществляются сезонно-циклические поступления трития в тропосферу, где формируются атмосферные осадки (в пределах каждого полушария имеются независимые резервуары).

Вертикальное распределение трития показывает, что его проникновение в верхние слои тропосферы начинается в декабре и продолжается до июня-июля [130]. Океан является резервуаром стока в системе круговорота трития. С удалением от моря наблюдается континентальный эффект.

В 1958 г. Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирной метеорологической ассоциацией принята совместная Международная программа по измерению изотопного состава воды в окружающей среде. В результате реализации пунктов Программы создана международная наблюдательная сеть стабильных изотопов (^2H , ^{18}O , ^1H , ^{16}O) и радиоактивного изотопа - трития в атмосферных осадках «[Global Network Isotopes in Precipitation](#)» (GNIP) [150], где в свободном доступе размещены сведения об изотопном составе атмосферных осадков из различных уголков планеты (всего 940 станций). Международная наблюдательная сеть по измерению трития в осадках в настоящее время насчитывает более 250 станций.

Всего с 2006 по 2013 гг. было проанализировано на стабильные изотопы ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) около 140 водных проб, из них 19 проб атмосферных осадков, 27 проб реки Бодрак, около 60 проб подземных вод. Атмосферные осадки отбирались на территории учебно-научной базы СПбГУ (д. Трудолобовка, N 44°47'10,0"; E 33°59'59,1").

5.2. Региональные сведения

Первое представление об изотопном составе атмосферных осадков полуострова Крым получили из базы данных глобальной сети изотопов в атмосферных осадках (GNIP), находящихся в свободном доступе на сайте Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [150].

В таблице 19 приведены станции из базы глобальной сети изотопов GNIP наиболее близкие исследуемому району (по широте, долготе и высоте над уровнем моря) со среднегодовыми содержаниями изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в атмосферных осадках на станциях. На рисунке 32 показаны концентрации $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ ближайших к Крымскому полуострову станций, исходя из этих данных среднегодовые атмосферные осадки над Крымским полуостровом ожидаются следующего состава: $\delta^2\text{H}$ около -60 и $\delta^{18}\text{O}$ около -8.

Таблица 19

Среднегодовые $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ на отдельных станциях из базы GNIP, близких в высотном-широтном отношении к Крымскому полуострову [150]

Номер GNIP	станция	N	E	Alt (м)	данные периода наблюдения	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰
1103500	Вена (Австрия)	48°15'00"	16°22'12"	203	1960-2009	-9,7	-70,1
1256500	Краков (Польша)	50°03'42"	19°50'55"	205	1975-2010	-9,8	-70,0
2685000	Минск (Беларуссия)	53°55'48"	27°37'48"	225	1980-1989	-10,8	-78,0
1664506	Саракина (Греция)	39°39'45"	21°38'15"	173	1968-1971	-6,2	-35
1646000	Катания (Италия)	37°32'18"	15°04'02"	200	1997-2000	-5,2	

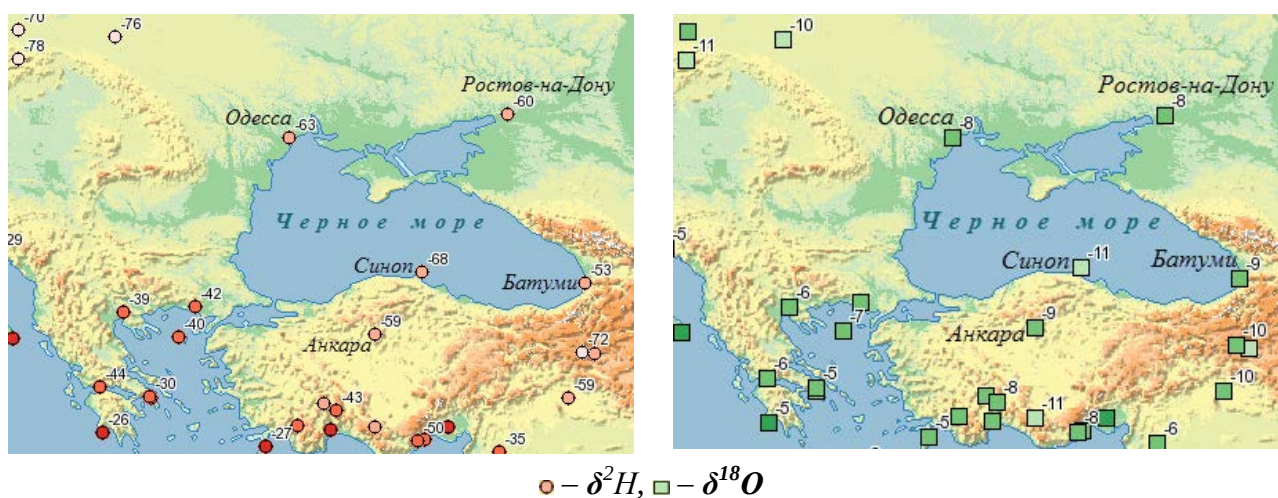


Рис. 32. Изотопный состав атмосферных осадков на станциях GNIP [150]

Как правило, наблюдения в выбранных станциях выполнялись не в полном объеме. Из них станция в Вене имеет наиболее длинный и представительный ряд наблюдений. Конечно, климатические условия и положение станции Вена (N 48°15'00", E 16°22'12", alt 203 м) не идеально подходят для сравнения с изучаемым районом, однако некоторые приблизительные оценки получить можно.

Данные по содержанию трития в глобальной сети изотопов в атмосферных осадках (GNIP) на отдельных станциях представлены также неравномерно. Рассмотрев имеющиеся

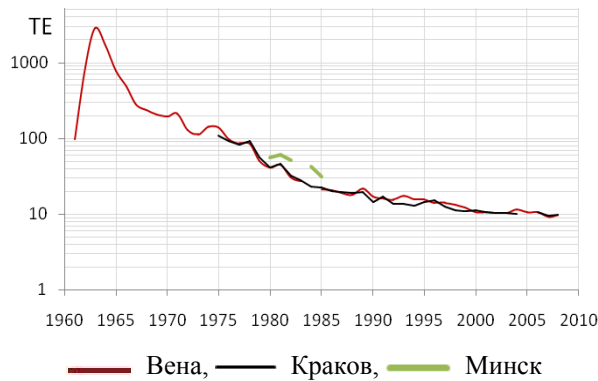


Рис. 33. Ход годовых концентраций трития в атмосферных осадках во времени

станции наиболее близкие к полуострову Крым (в широтно-высотном отношении) получим зависимость изменения содержаний трития в атмосферных осадках во времени (рис. 33).

На территории Украины по данным В.А. Дячук [37] в 70–х гг. прошлого века после прекращения испытаний водородных бомб концентрации трития превышали современные в 5 – 10 раз, в конце XX в. содержания трития в осадках становятся низкими, близкими к глобальным фоновым. Средняя многолетняя концентрация трития в атмосферных осадках для региона Западной Европы составляет 3,6 Бк/л (30,5 TE), для Украины - 3,3 Бк/л (28,0 TE) [37].

В атмосферных осадках существуют сезонные колебания соотношений стабильных изотопов: летом осадки утяжеляются, а зимой облегчаются (рис. 34), вызванные сезонными изменениями температур конденсации водяного пара [46, 130, 156]. Сезонный ход осадков на различных станциях имеет некоторые отличия. Годичные вариации $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках могут составлять 5 – 10 % (рис. 34).

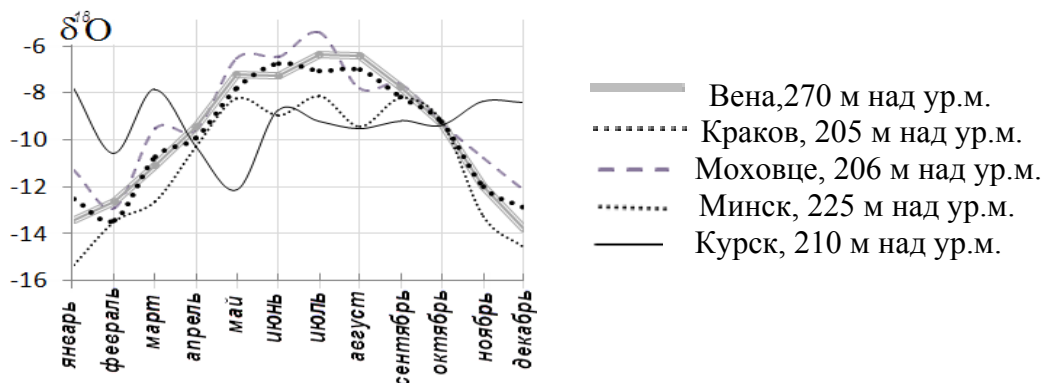


Рис. 34. Внутригодовой ход $\delta^{18}\text{O}$ в осадках на отдельных станциях из базы GNIP [150]

Во всем мире для интерпретации изотопных данных используют глобальную линию метеорных вод (ГЛМВ) [148]: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$, однако, в конкретных местных условиях линия метеорных вод может быть несколько смещена и иметь другой уклон. Например, линия метеорных вод Восточного Средиземноморья: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 22$ [149]. Для станции в Вене, близкой по высотным отметкам к району исследования и имеющей длинный и представительный ряд наблюдений, линия метеорных вод: $\delta^2\text{H} = 7,2 \delta^{18}\text{O} - 0,34$ [150]. Локальная линия метеорных вод северного склона Крымских гор, построенная по результатам двухлетних наблюдений, описывается линией: $\delta^2\text{H} = 7 \delta^{18}\text{O} + 3,2$ [36].

На рис. 35 показаны взаимоотношения между ГЛМВ и локальными линиями метеорных вод. Интересно, что линия метеорных вод Крыма (точнее северного склона Главной гряды) отстоит дальше от линии метеорных вод Восточного Средиземноморья, чем от линии в Вене. При недостатке данных можно воспользоваться материалами многолетнего мониторинга станции Вена, находящимися в свободном доступе.

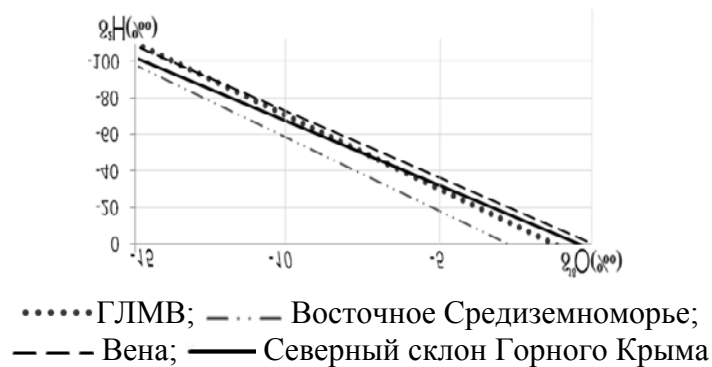


Рис. 35. Взаиморасположение глобальной линии и некоторых локальных линий метеорных вод

5.3. Тритий в водах северо-западных склонов Крымских гор

В грунтовых водах бассейна р. Бодрак ожидалось содержания трития близкие атмосферным осадкам, что в результате исследования и подтвердилось, так как источник трития - атмосферная вода. Несмотря на региональную тенденцию к снижению концентрации трития с течением времени (в силу радиоактивного распада) [130, 150, 152], содержания трития во всех природных водах летом 2010 г. были выше, чем летом 2009 г. и 2006 г., что вероятно связано с конкретными естественными условиями (ветровыми переносами, влажностью поступающего на территорию воздуха и т.п.).

В июне-июле 2010 г. (когда были определены наиболее высокие концентрации трития в атмосферных осадках) преобладали восточные ветра большой силы, что хорошо видно на розах ветров, построенных с учетом силы ветра (рис. 36, слева). Возможно, метеоусловия, а именно ветровой перенос радиоактивных веществ с более загрязненных территорий,

повлияли на повышенные значения трития в атмосферных осадках. Также, ветры северных, северо-восточных и восточных румбов несут влияние континента, и значит атмосферная влага не разбавлена низкоактивной океанической водой.



Рис. 36. Розы ветров (июнь-июль) по данным метеостанция п. Почтовый (слева); ход июльских концентраций трития в атмосферных осадках во времени (справа)

Поскольку мы имеем явный недостаток данных, воспользуемся свободными материалами с сайта GNIP [150]. На рис. 36 справа по измерениям ряда станций из базы данных GNIP можно проследить, как менялись концентрации трития в июле от года к году. Данные по осадкам д. Трудюлюбовки за 2006 г. и 2009 г. вполне укладываются в общую картину, данные 2010 г. - выпадают (возможно, повышенные относительно фоновых значения трития в метеорных водах имеют техногенное происхождение).

В 2009 г. во всех природных водах района содержания трития находились на уровне естественных значений [18]. В 2009 г. на тритий были проанализированы все основные реки северо-западного склона Крымских гор (14 проб); концентрации менялись от 2 до 9 ТЕ, со средним значением 5,5 ТЕ. В родниках концентрация трития составила в среднем 5,6 ТЕ (5 проб), в колодцах - 7 ТЕ (8 проб). Содержания трития в водах р. Бодрак летом 2009 г. менялось от 4,2 до 8,1 ТЕ (3 пробы) (табл. 20).

Таблица 20

Содержания трития в природных водах северо-западного склона Крымских гор (июнь-июль 2006, 2009-2010 гг.)

Дата	Атмосферные осадки		Поверхностные воды		Грунтовые воды	
	кол-во проб	тритий, ТЕ	кол-во проб	тритий, ТЕ	кол-во проб	тритий, ТЕ
июль 2006	1	18,5				
июль 2009	1	6,3	17	5,7	13	6,4
июнь 2010	7	33,7	-	-	2	22,0

Одна проба р. Бодрак была отобрана в марте 2010 г. – 17,9 ТЕ (причем в марте 2010 г. выпала почти двойная норма осадков, а значит в составе поверхностного стока р. Бодрак был большой процент мартовских атмосферных осадков). Согласно данным сезонных колебаний из базы GNIP для станций близких в высотно-широтном отношении изучаемому району, более низкие концентрации отвечают зимним месяцам; из чего следует, что меженный сток р. Бодрак в июне-июле осуществлялся за счет зимне-весенних осадков.

Минимальные концентрации трития (ниже предела обнаружения) были определены для колодца по ул. Севастопольская, д. 4 в июле 2009 г., что подтвердило наличие здесь притоков воды из зоны замедленного водообмена (следует отметить, что осадков летом 2009 г. выпало меньше средних многолетних).

Концентрации трития в грунтовых водах северо-западного склона Крымских гор в 2010 г. также (как и атмосферные осадки) имели по сравнению с 2009 г. несколько повышенные значения, что свидетельствует о высоких скоростях водообмена в изучаемом районе (то есть подземные воды формировались за счет осадков текущего года). К сожалению, использование трития на малых водосборах с высокими скоростями водообмена имеет ограниченные возможности.

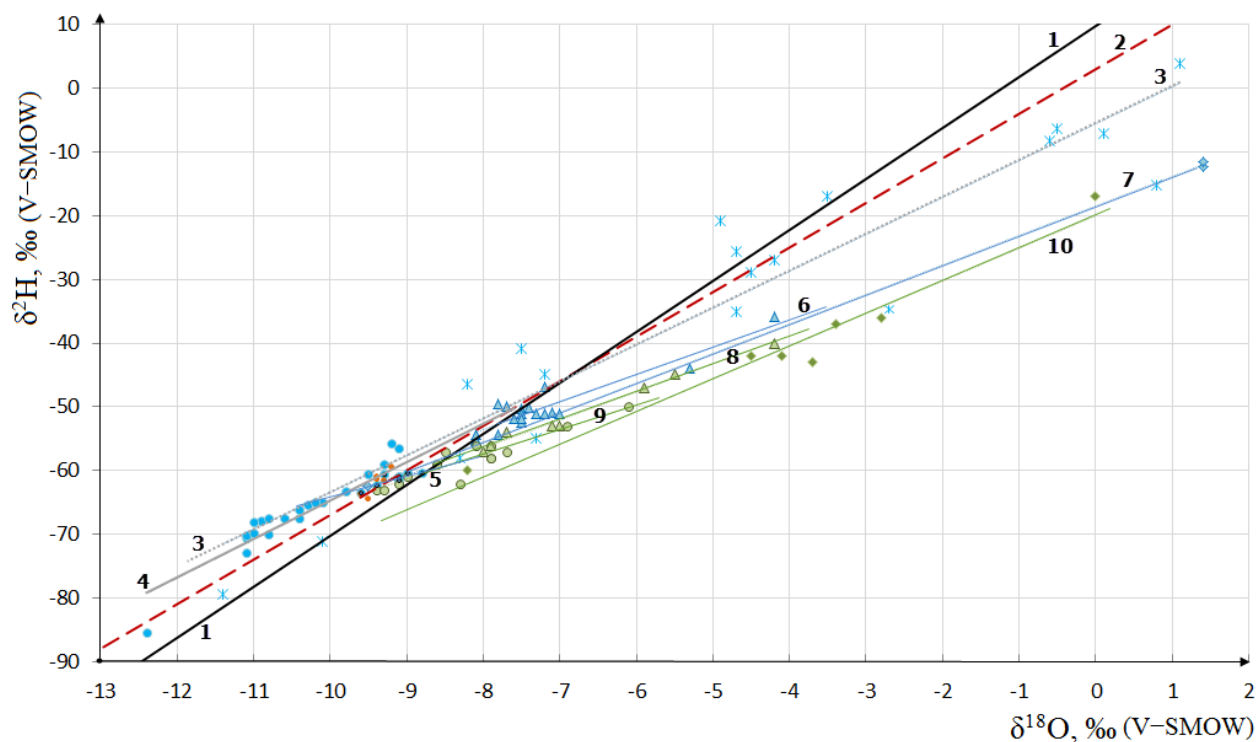
5.4. Стабильные изотопы $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в природных водах бассейна р. Бодрак

5.4.1. Результаты изотопных исследований Горного Крыма

Полученные за период исследования данные на содержание стабильных изотопов $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в природных водах Горного Крыма представлены на графиках в координатах $\delta^{18}\text{O} \div \delta^2\text{H}$ относительно глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) (рис. 37), здесь же изображена локальная линия метеорных вод северного склона Крымских гор (ЛЛМВ), полученная Ю.В. Дублянским и др. по результатам двухлетних исследований [36].

Изотопный состав природных вод может меняться за счет фракционирования (разделения) изотопов водорода и кислорода под воздействием ряда факторов, основными из них на изучаемой территории являются процессы испарения. Вероятно, в отдельных случаях возможен изотопный обмен с водовмещающими породами, но эти процессы не повсеместны, так как район расположен в области активного водообмена. Процессы разделения изотопов могут идти как в поверхностных условиях, так и в подземных.

В результате фракционирования фигуративные точки природных вод могут смещаться относительно ЛЛМВ, их расположение в рамках диаграммы $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ позволяет сделать некоторые диагностические выводы.



	№ линии регрессии	Условные обозначения:	Уравнения регрессии	Кол-во проб	Лаборатория
	1	Глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ)	$y = 8x + 10$		[148]
	2	Локальная линия (ЛЛМВ)	$y = 7x + 3,2$		[36]
	3	Летние осадки, 2013, д. Трудолюбовка	$y = 5,78x - 5,65$ ($R^2 = 0,89$)	19	ЛИГФ СПбГУ
	4	Подземные воды Горного Крыма, 2013	$y = 6,04x - 4,25$ ($R^2 = 0,87$)	25	ЛИГФ СПбГУ
		из них источники Горного Крыма, 2013	$y = 6,77x + 3,41$ ($R^2 = 0,89$)	21	ЛИГФ СПбГУ
	5	Подземные воды бассейна р. Бодрак, 2013	$y = 3,485x - 29,33$ ($R^2 = 0,69$)	9	ЛИГФ СПбГУ
	6	Река Бодрак, 2013	$y = 4,297x - 19,19$ ($R^2 = 0,87$)	19	ЛИГФ СПбГУ
	7	Водоемы (ставки) бассейна р. Бодрак, 2013	$y = 4,633x - 18,39$ ($R^2 = 1$)	3	ЛИГФ СПбГУ
	8	Река Бодрак, 2012	$y = 4,409x - 21,25$ ($R^2 = 0,99$)	8	РЦ «Геомодель»
	9	Подземные воды бассейна р. Бодрак, 2012	$y = 3,878x - 26,44$ ($R^2 = 0,87$)	14	РЦ «Геомодель»
	10	Водоемы (ставки) бассейна р. Бодрак, 2012	$y = 5,129x - 20,01$ ($R^2 = 0,96$)	7	РЦ «Геомодель»
		Подземные воды бассейна р. Бодрак, 2006	$y = 11,6x + 47,19$ ($R^2 = 0,79$)	6	ВСЕГЕИ

Рис. 37. Изотопный состав природных вод бассейна р. Бодрак (2006-2013 гг.)

5.4.2. Изотопный состав атмосферных осадков в предгорьях Крыма

Наиболее полно изотопный состав атмосферных осадков изучаемого района был исследован в 2013 г., так как летний сезон этого года выдался дождливым – только за июнь было отобрано 14 проб атмосферных осадков. В этом месяце выпало около 40% годовой нормы осадков [36, 68]. Средние значения всех имеющихся проб за июнь-июль 2013 г. (19 проб) составили: $-4,6\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $32,5\text{‰}$ для $\delta^2\text{H}$. Из них 6 проб связаны с интенсивными

осадками (более 20 мм). По данным В.Н. Дублянского [34] в Горном Крыму при мощности почвенного слоя 25–30 см инфильтрационное питание в теплый период возможно только при осадках интенсивностью более 20 мм/сут.

Средневзвешенные осадки за июнь 2013 г. по данным 14 проб дождевых вод получились: $-4,0\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $-28,4\text{‰}$ для $\delta^2\text{H}$. Средневзвешенные значения 6 проб за июнь 2013 г. с интенсивностью 17 мм/сут. и выше составили: $-4,2\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $-30,3\text{‰}$ для $\delta^2\text{H}$. То есть ливни и длительные дожди имеют более легкий изотопный состав, чем суммарные атмосферные осадки. Следует также отметить, что самые интенсивные осадки в количестве 58 мм, зафиксированные 4.07.2013, имели самый легкий изотопный состав из всех имеющихся в наличии проб: $-11,4\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $-79,5\text{‰}$ для $\delta^2\text{H}$. Ранее было выявлено, что длительные дожди менее минерализованы, чем кратковременные [52].

Среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ определить не представлялось возможным, так как полевые работы проводились только летом. Однако для 2011 г. необходимые сведения были получены интерполяцией опубликованных данных по $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ для станций Симферополь и Чатырдаг [36]. По этим данным высотный градиент среднегодовых значений средневзвешенных атмосферных осадков северного склона Крымских гор для $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-0,17\text{‰}/100\text{ м}$, для $\delta^2\text{H}$ градиент соответствует $-1,1\text{‰}/100\text{ м}$.

В таблице 21 представлены годовые средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в атмосферных осадках для станций Симферополь и Чатырдаг в 2011 г. Исходя из этих данных среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ для атмосферных осадков д. Трудолюбовки ожидаются: $-7,4\text{‰}$ и $-50,1\text{‰}$ соответственно, на метеостанции п. Почтовый - около $-7,2\text{‰}$ и $-49,0\text{‰}$.

Таблица 21

Изотопный состав атмосферных осадков Горного Крыма

Пункт сбора атмосферных осадков	GPS привязка	Alt, м над ур.м.	Среднегодовые средневзвешенные		Источник данных
			$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$	$\delta^2\text{H}, \text{‰}$	
Чатырдаг	-	980	-8,6	-57,8	Литературные данные [36]
Симферополь	-	280	-7,4	-50,2	Литературные данные [36]
д.Трудолюбовка	N 44°47'10,0" E 33°59'59,1"	270	-7,4	-50,1	Расчетные данные [68]
п.Почтовый	N 44°50' E 33°57'	172	-7,2	-49,0	Расчетные данные [68]

Так как изотопный состав атмосферных осадков контролируется не только ветровым режимом, но и ходом температуры [130], была рассчитана зависимость между температурой приземного воздуха и величинами $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$. Для этого из архива погодных условий [123, 124] были получены температуры воздуха во время выпадения атмосферных осадков и

привлечены собственные данные по содержанию дейтерия и кислорода-18, приведенные с учетом высотного градиента к альтитуде метеостанции п. Почтовый.

По данным 14 проб атмосферных осадков, отобранных в июне 2013 г. (табл. 22), была выявлена связь температур приземного воздуха в период выпадения осадков и содержаний стабильных изотопов в осадках: для дейтерия – $\delta^2\text{H} = 2,38 \cdot T - 76,8$.

С привлечением данных о количествах атмосферных осадков, полученных с сайта архива погодных условий [123, 124], посчитали средневзвешенные значения изотопов в осадках на метеостанции п. Почтовый за июнь 2013 г. (всего 14 проб), которые составили: -4,0‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -28,1‰ для $\delta^2\text{H}$ (с учетом высотного градиента). Средние предположительные (расчетные) содержания дейтерия и кислорода-18 для атмосферных осадков д. Трудолюбовки (alt 270 м) в различные месяцы года представлены в таблице 22.

Таблица 22

Средние содержания дейтерия и кислорода-18 в атмосферных осадках д. Трудолюбовки на основе гипотетических уравнений: $\delta^2\text{H} = 2,38 \cdot T - 76,8$ и $\delta^{18}\text{O} = 0,37 \cdot T - 11,5$

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	ГОД
$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$	-10,9	-10,8	-9,7	-7,8	-6,1	-4,4	-3,3	-3,4	-5,3	-7,4	-9,0	-10,4	-7,4
$\delta^2\text{H}, \text{‰}$	-73,1	-72,5	-65,0	-53,0	-41,6	-30,6	-23,3	-24,6	-36,7	-50,2	-60,8	-69,8	-50,1

5.4.3. Стабильные изотопы $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ и сток р. Бодрак

На графиках (рис. 36, 38) отчетливо видно, что в 2012 г. все точки, соответствующие водам р. Бодрак, расположились вдоль линии, имеющей тангенс угла наклона около 4 в координатах $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$, причем точки р. Бодрак 2012 г. легли на одну линию с подземными водами бассейна. Линии регрессий р. Бодрак 2012 и 2013 гг. расположились практически параллельно друг другу. Параллельно этим линиям проведем еще одну прямую через единственную точку 2006 г. и примем ее за линию регрессии 2006 г.: $y = 4,4x - 29,72$.

Смещение точки р. Бодрак 2006 г. вследствие испарения наиболее вероятно. По данным диаграммы $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ (рис. 38) можно предположить, что сток р. Бодрак в июне 2006 г. сформировался из изотопно более легких осадков (точка пересечения ЛЛМВ и линии на которой лежит точка р. Бодрак 2006 г.).

Атмосферные осадки холодных месяцев года обеднены тяжелыми изотопами кислорода и водорода по сравнению с теплыми, это хорошо видно на рис. 39, где представлены графики хода осадков станции в Вене и метеостанции п. Почтовый, позволяющие предположить изотопный состав при отсутствии данных [150].

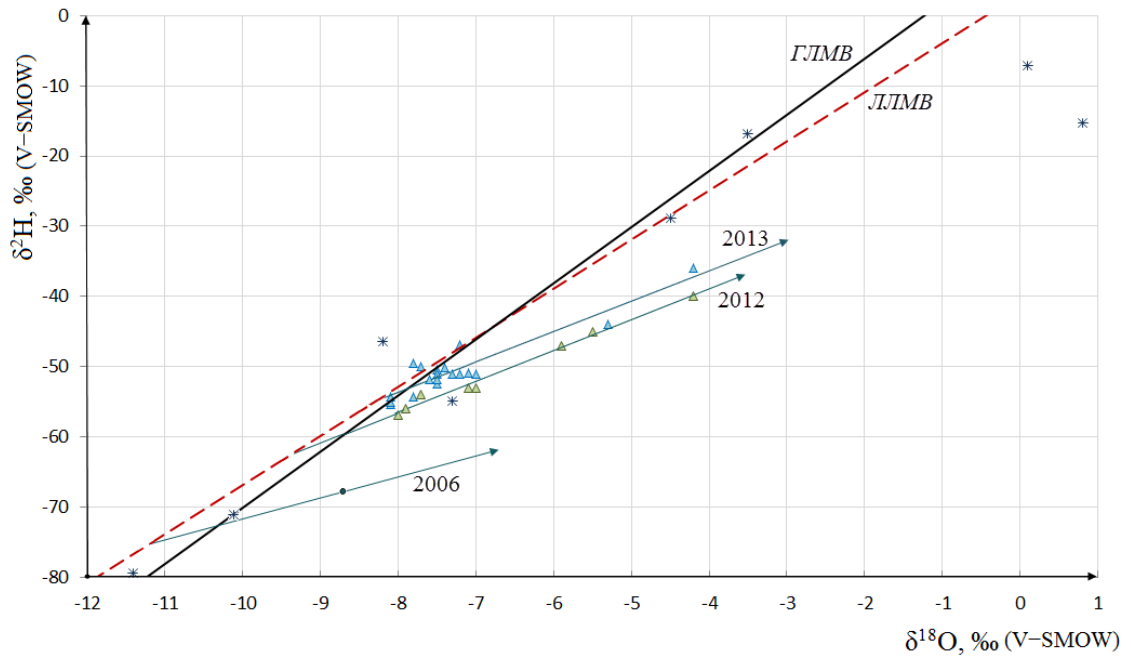


Рис. 38. Изотопный состав р. Бодрак (июнь-июль 2006, 2012, 2013 гг.)

Согласно рис. 39, и данным [36, 150] атмосферные осадки, обеспечившие меженный сток в июле 2006 г., могли выпасть скорее в зимние месяцы (в декабре 2005 г. выпало около 90 мм осадков), в 2012 и 2013 гг. – вероятно в зимне-весенние. Из трех изучаемых лет зима 2005–2006 г. и осень 2006 г. выдались наиболее холодными. То есть атмосферные осадки, обеспечившие меженный сток р. Бодрак летом 2006 г. образовались в более суровых климатических условиях в отличие от 2012 и 2013 гг., об этом говорит и график на рисунке 38 (линия регрессии р. Бодрак 2006 г. находится в нижней облегченной части диаграммы). При этом в декабре 2005 г. выпало две нормы месячных осадков. Наиболее теплыми из трех изучаемых лет были: зима 2012-2013 и весна 2013 г. Линия регрессии р. Бодрак 2013 г. расположилась в области утяжеленной части диаграммы.

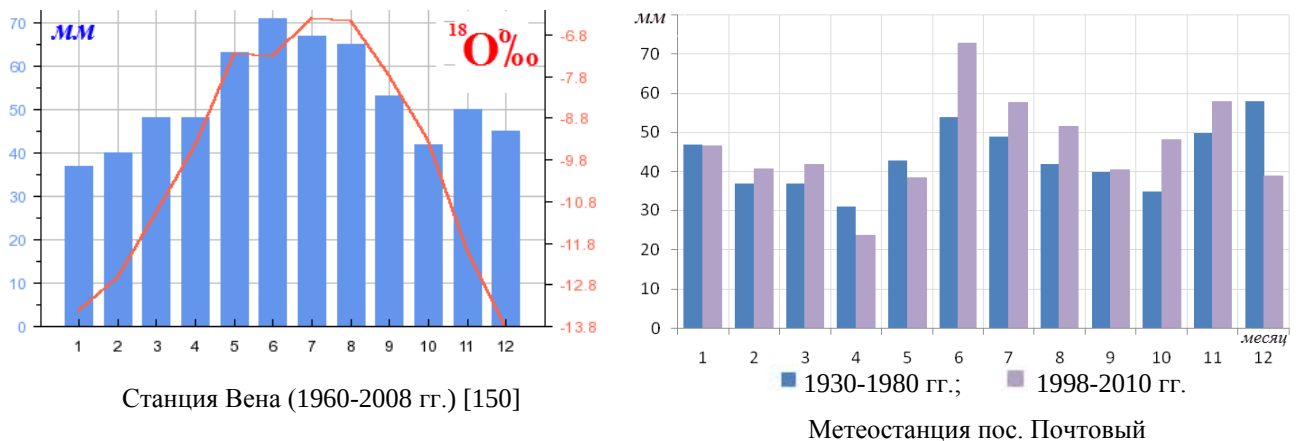


Рис. 39. Ход атмосферных осадков станций Вены и пос. Почтовый

В летний период воды р. Бодрак (как и атмосферные осадки) утяжеляются, а в осенне-зимний и весенний периоды – обедняются изотопами кислорода-18 и дейтерия.

На сток р. Бодрак огромное влияние оказывает источник Вербочки из Московского оврага. Зачастую летний меженный сток осуществляется исключительно за счет его вод. В отдельные жаркие периоды года, когда мощность источника Вербочки существенно уменьшается, р. Бодрак полностью пересыхает.

Фигуративные точки ставок (искусственных водоемов) бассейна р. Бодрак на диаграмме $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ занимают особое положение (рис. 37), их изотопное отличие от других вод изучаемого района связано с тем, что они в условиях местного климата подвергаются существенному испарению: угловой коэффициент 4,6 (2013 г.) и 5,1 (2012 г.).

Изменения изотопного состава природных вод под воздействием процессов испарения фиксируются снижением углового коэффициента (тангенса угла наклона) линий регрессии до 4 – 6 [33, 130]. Ставки заполняются сезонно дождевыми и паводковыми водами р. Бодрак, значительную роль при этом играют притоки подземных вод. Обычно вода в ставках к концу лета становится тяжелее воды питающих их источников за счет испарения изотопно легких молекул воды.

Чтобы выяснить, как режим р. Бодрак согласуется с ходом атмосферных осадков, найдем зависимость расходов р. Бодрак от хода осадков. Имея в своем распоряжении лишь данные по расходам р. Бодрак за период 1963 – 1967 гг. [27], построим график, используя эти данные и нормы температуры воздуха и количества атмосферных осадков за 1930–1980 гг. (рис. 40). Наибольшую корреляцию расход р. Бодрак с ходом атмосферных осадков имеет при временном сдвиге в два месяца ($R^2=0,8$).

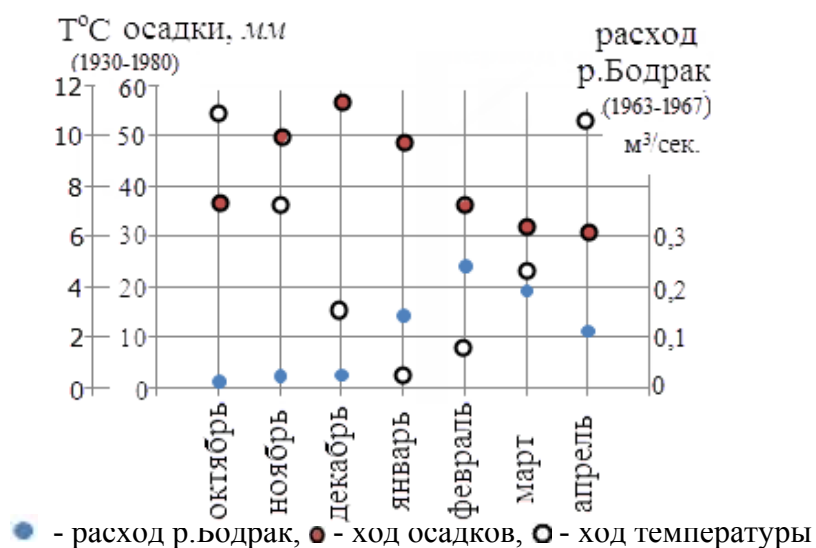


Рис. 40. Зависимость расходов р.Бодрак от хода атмосферных осадков и температуры воздуха

5.4.4. Стабильные изотопы $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в подземных водах Горного Крыма

В 2013 г. было проведено расширенное опробование родников Горного Крыма. Всего было отобрано 25 проб подземных вод, из них за пределами бассейна р. Бодрак отобрано 16 образцов из источников. Уравнение регрессии для родниковых вод Горного Крыма имеет вид: $y = 6,8x + 3,4$. Угловой коэффициент весьма близок коэффициенту ЛЛМВ (рис. 35, 37).

В таблице 23 представлены данные 2012-2013 гг. опробования на содержание $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в подземных водах Горного Крыма.

Таблица 23

Изотопный состав источников Горного Крыма

Дата отбора	Название источника	Привязка		$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	лаборатория
		N	E			
12.06.12	Шелудивая	44°45'41,0"	34°00'01,8"	-6,1	-50	РЦ «Геомодель»
21.06.12	Патиль	44°46'18,3"	33°59'46,1"	-8,1	-56	РЦ «Геомодель»
23.06.12	Успенский монастырь	44°44'39"	33°54'36"	-9,1	-62	РЦ «Геомодель»
26.06.12	Вербочки	44°46'22,1"	33°59'15,8"	-8,3	-62	РЦ «Геомодель»
08.07.12	между Керменами	44°46'26,2"	34°00'41,8"	-8,5	-57	РЦ «Геомодель»
09.07.12	Афениз	44°47'26,5"	34°01'54,1"	-9,4	-63	РЦ «Геомодель»
09.07.12	домик лесника	44°47'31,3"	34°00'21,8"	-9,0	-61	РЦ «Геомодель»
14.07.12	Балта-Чокрак, Корабельная куэста	44°47'26,5"	33°57'34,1"	-8,6	-59	РЦ «Геомодель»
15.07.12	Лесистая	44°47'15,0"	34°00'58,44"	-9,3	-63	РЦ «Геомодель»
23.06.13	между Керменами	44°46'26,2"	34°00'41,8"	-9,1	-60,9	ЛИГФ СПбГУ
23.06.13	Патиль	44°46'37,0"	33°59'29,1"	-9,1	-61,5	ЛИГФ СПбГУ
29.06.13	Балта-Чокрак, Корабельная куэста	44°47'26,5"	33°57'34,1"	-9,6	-63,4	ЛИГФ СПбГУ
11.07.13	Патиль	44°46'37,0"	33°59'29,1"	-9,4	-62,2	ЛИГФ СПбГУ
13.07.13	между Керменами (слабый дебет)	44°46'26,2"	34°00'41,8"	-9,3	-60,5	ЛИГФ СПбГУ
16.07.13	Агармыш (пересохший)	44°46'37,9"	34°22'29,8"	-10,4	-67,4	ЛИГФ СПбГУ
17.07.13	Пания, Большой каньон	44°31'19,4"	34°00'14,2"	-10,4	-66,2	ЛИГФ СПбГУ
18.07.13	Опук	45°01'57"	36°13'41"	-9,8	-63,2	ЛИГФ СПбГУ
27.06.13	Св. источник под г. Ай-Никола, Ялта, Н.Ореанда-Гаспра	44°027	34°07	-9,2	-55,7	ЛИГФ СПбГУ
28.06.13	Радостное	44°46'37,9"	34°22'29,8"	-10,3	-65,4	ЛИГФ СПбГУ
28.06.13	Вриси. Ангарский перевал, юж. склон хребта Эльк-Кая	44°46'37,9"	34°22'29,8"	-10,8	-70	ЛИГФ СПбГУ
28.06.13	под г. Пахкал-Кая (С.Демерджи). перевал Фуна	44°46'69,8"	34°22'34,5"	-10,6	-67,4	ЛИГФ СПбГУ
30.06.13	под склоном Ю.Демерджи (от Джур-Джур к Джурле.)	44°46'37,9"	34°22'29,8"	-10,9	-67,8	ЛИГФ СПбГУ
июл.13	Коктебель, родник Лягушка	44°57'37"	35°12'0"	-9,5	-60,6	ЛИГФ СПбГУ
июл.13	ниже Лягушки	44°46'37,9"	34°22'29,8"	-9,3	-58,9	ЛИГФ СПбГУ
01.07.13	метеостанция, Ангарский перевал	44°45'07,5"	34°20'41,9"	-11,0	-68	ЛИГФ СПбГУ
02.07.13	у Кутузовского озера, южный макросклон Чатырдага	44°44'10,5"	34°20'12,0"	-10,8	-67,4	ЛИГФ СПбГУ
03.07.13	Чатырдаг, Грушевая поляна	44°45'61,0"	34°19'73,0"	-11,1	-70,5	ЛИГФ СПбГУ
06.07.13	Св. источник, монастырь Козьмы и Демьяна	44°39'94,1"	34°16'24,3"	-11,1	-72,9	ЛИГФ СПбГУ
09.07.13	Родник Молитва	44°41'52,7"	33°52'56,8"	-9,1	-56,5	ЛИГФ СПбГУ
05.07.13	Перевальное, у Красных пещер	44°51'69,6"	34°20'06,3"	-12,4	-85,3	ЛИГФ СПбГУ

Практически все точки 2013 г. (за исключением источника у Красных пещер) расположились слева от ЛЛМВ (рис. 37). Возможно это связано с изотопным обменом между водой и углекислым газом, содержащимся в водах источников. Уместно напомнить, что лето 2013 г. отличалось аномальным количеством осадков, которые хорошо пополнили резервуары подземных вод Горного Коряма.

Из всех проанализированных проб средний изотопный состав подземных вод бассейна р. Бодрак оказался несколько тяжелее, чем всего Горного Крыма. Это связано в первую очередь с тем, что колодцы за пределами бассейна р. Бодрак не опробовались, а также с тем, что источники опробованные за пределами бассейна р. Бодрак расположены в большинстве своем гипсометрически выше. Источники Горного Крыма обогащены легкими изотопами за счет подпитки водами снеготаяния в зимний период, как известно, атмосферные осадки холодных месяцев года обеднены тяжелыми изотопами кислорода и водорода по сравнению с теплыми месяцами [55, 130]. Наиболее крайнее положение занимают две точки 2012 г. опробования: родник на г. Шелудивая и колодец Марлена. В первом случае разгрузка подземных вод связана с областью трещиноватости флишевых пород, во втором случае в колодце выявлены притоки солоноватых хлоридно-натриевых вод из области замедленного водообмена.

В 2013 г. подземные воды зоны активного водообмена несколько легче в изотопном составе, чем в 2012 г., что можно объяснить наличием большего количества атмосферных осадков (только в июне зафиксировано четыре дождя интенсивностью более 20 мм). Все проанализированные пробы подземных вод бассейна р. Бодрак 2006, 2012, 2013 гг. опробования имеют небольшой разброс и, следовательно, имеют родственный генезис (рис. 37). Все точки подземных вод располагаются вдоль локальной линии (ЛЛМВ) и на достаточно близком от нее расстоянии, что является доказательством их метеогенной природы.

5.4.5. Средний изотопный состав природных вод бассейна р. Бодрак

Средние концентрации стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) подземных вод бассейна р. Бодрак в летний период меньше, чем средние содержание данных изотопов в летних атмосферных осадках (табл. 24), что связано с тем, что подземные воды формировались за счет более легких зимне-весенних осадков, летние же осадки идут, главным образом, на испарение.

Фигуративные точки ставок (искусственных водоемов) бассейна р. Бодрак на диаграмме $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ занимают особое положение, их изотопное отличие от других вод

изучаемого района связано с тем, что они в условиях местного климата подвергаются существенному испарению: угловой коэффициент 5,1 (2012 г.).

Тангенс угла наклона прямой в координатах $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$, описываемой уравнением ГЛМВ (ЛЛМВ) в зависимости от условий испарения уменьшается до 4 – 6 [33, 129]. Ставки заполняются сезонно дождевыми и паводковыми водами р. Бодрак, значительную роль при этом играют притоки подземных вод. Обычно вода ставок к концу лета становится тяжелее воды питающих их источников за счет преимущественного испарения изотопно легких молекул воды.

Таблица 24

Средний изотопный состав природных вод бассейна р. Бодрак
летний период 2006-2013 гг.

Тип источника	Год	Кол-во проб	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	Лаборатория	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰
						средние значения	
река Бодрак	2006	1	-8,7	-68,0	ВСЕГИНГЕО	-7,6	-56,3
	2012	8	-6,7	-50,6	РЦ «Геомодель»; ЛИГФ СПбГУ		
	2013	19	-7,3	-50,4	ЛИГФ СПбГУ		
колодцы бассейна р.Бодрак	2006	2	-9,4	-61,5	ВСЕГЕИ	-8,7	-59,6
	2012	5	-7,7	-56,4	РЦ «Геомодель»		
	2013	4	-9,0	-60,8	ЛИГФ СПбГУ		
родники бассейна р.Бодрак	2006	4	-9,4	-62,0	ВСЕГЕИ	-8,9	-60,5
	2012	8	-8,4	-58,9	РЦ «Геомодель»		
	2013	5	-9,3	-61,7	ЛИГФ СПбГУ		
источники Горного Крыма	2013	19	-10,3	-65,2	ЛИГФ СПбГУ	-10,3	-65,2
ставки бассейна р.Бодрак	2012	7	-3,8	-39,6	ЛИГФ СПбГУ	-3,0	-34,2
	2013	3	-2,2	-28,7	ЛИГФ СПбГУ		
средневзвешенные осадки >17 мм [68] д.Трудолюбовка	2013, июнь	6	-4,2	-30,3	ЛИГФ СПбГУ	-7,9	-55,6
среднегодовые осадки д.Трудолюбовка	средние 2010-2011				по литературным данным [36]	-7,4	-50,1

Примечание: подробный изотопный состав вод Горного Крыма приведен в приложении 12

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5

1. Подземные воды в Предгорьях Крыма имеют метеогенную природу и формируются, главным образом, за счет более легких зимне-весенних атмосферных осадков.
2. Подземные воды в пределах Второй гряды Крымских гор отличаются высокими скоростями водообмена, поскольку формируются за счет осадков текущего года. Данные по тритию подтвердили: на глубинах более 20 – 30 м существуют притоки подземных вод из зоны замедленного водообмена.
3. Величины содержаний трития в природных водах бассейна р. Бодрак близки к фоновым значениям в Предгорьях Крыма. При ветровом переносе с северо-востока и востока в атмосферных осадках отмечаются повышенные уровни ^3H .
4. По природе растворителя основными «первоисточниками» во всех типах подземных вод Горного Крыма являются метеорные воды.
5. В летний период природные воды северо-западных склонов Крымских гор утяжеляются изотопами кислорода-18 и дейтерия.
6. Подземный сток рек северо-западных склонов Крымских гор со средней отметкой профиля речного русла 340 м над ур.м. формируется главным образом за счет зимне-весенних осадков; в летнюю межень подземный сток осуществляется за счет весенних осадков.
7. Осадки, идущие на питание подземных вод в летний период (то есть осадки интенсивностью более 17 мм/сут.), легче среднемесячных, их взвешенный состав: $-4,2\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $-30,3\text{‰}$ для $\delta^2\text{H}$.
8. Рассчитаны средние содержания дейтерия и кислорода-18 для каждого месяца года в атмосферных осадках д. Трудолюбовки с привлечением гипотетических уравнений ($\delta^2\text{H} = 2,38 \cdot T - 76,8$ и $\delta^{18}\text{O} = 0,37 \cdot T - 11,5$), полученных на основе выявленной связи температур приземного воздуха в период выпадения осадков и содержаний стабильных изотопов в осадках (по данным 14 проб).
9. Средние концентрации стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) в подземных водах бассейна р. Бодрак в летний период меньше, чем средние содержания данных изотопов в летних атмосферных осадках; это связано с тем, что подземные воды формируются, глвным образом, за счет более легких зимне-весенних осадков, подавляющая доля летних осадков идет на испарение.

10. Изотопный состав поверхностных вод в условиях местного климата формируется под воздействием процессов испарения: фигуративные точки, соответствующие водам искусственных водоемов бассейна р. Бодрак (ставков) по данным 2012 г., располагаются на диаграмме $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ вдоль линии с угловым коэффициентом 5,1.

11. По соотношению стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$) воды р. Бодрак соответствуют рекам зоны умеренного климата. Режим р. Бодрак имеет временной сдвиг около двух месяцев по сравнению с ходом атмосферных осадков; летний меженный сток р. Бодрак осуществляется за счет зимних осадков.

Глава 6. ВОДНЫЙ БАЛАНС БАССЕЙНА РЕКИ БОДРАК И ЕГО ОСНОВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

6.1. Уравнение водного баланса речного бассейна

Понятие водного баланса сводится к количественному выражению процесса климатического круговорота воды. Для определения водного баланса речного бассейна и его составляющих широко используется уравнение, которое в общем виде сформулировано еще А.И.Воейковым (1884 г.), позднее представлено А. Пенком (1896 г.) как трехчленное математическое выражение круговорота воды, уточненное и обобщенное Е.В. Оппоковым (1904 г.) [17, 39, 86, 112], разрабатывалось Б.И. Куделиным [87], М.И.Львовичем [16, 93] и другими исследователями [16]. Выражение Пенка-Оппокова за среднемноголетний период представляет собой простое уравнение водного баланса речного бассейна:

$$Y = P - E, \quad (20)$$

где речной сток (Y) выступает как разность осадков (P) и испарения (E).

Данное уравнение широко использовалось в практических целях для косвенной оценки подземного стока, поскольку метеорологические наблюдения территорий шли далеко впереди гидрологических наблюдений за речным стоком. В начале XX в. появилась масса расчетных и эмпирических зависимостей речного стока от метеорологических факторов и морфометрических характеристик водосборов. Однако достаточно надежные зависимости далеко не всегда находились. Большую влияние на сток оказывают ландшафтные условия (почвы, лесистость, закарстованность, озерность, несовпадения поверхностного и подземного водосборов и т.п.), а их не просто учитывать.

Применительно к бассейну р. Бодрак (границы участка - водоразделы, формирующие водосборную площадь р. Бодрак, и нижний створ, расположенный у впадения р. Бодрак в р. Альму) построим уравнение:

$$P + Z + T = h + W + E \pm \Delta U. \quad (21)$$

Приходная часть:

P — атмосферные осадки, на поверхности речного бассейна;

Z — конденсация водяного пара; T — подземный приток.

Расходная часть:

h — поверхностный (паводочный) сток;

W — подземный (устойчивый) речной сток;

E — суммарное испарение с водосборного бассейна.

Изменение влагозапасов на водосборе, погрешности измерений: $\pm \Delta U$.

В засушливые годы общий объем подземной и наземной влаги меньше, чем во влажные годы, поэтому в засушливые годы расход превышает приход на величину U , а во влажные годы происходит обратное явление.

Для многолетнего периода (при $U \rightarrow \infty$) уравнение водного баланса (при совпадении подземного и поверхностного водоразделов) имеет вид:

$$P_o = Y_o + E_o, \quad (22)$$

$$\text{где } Y_o = h + W.$$

6.1. Осадки (P)

Атмосферные осадки – основной элемент приходной части уравнения водного баланса. Средний слой осадков на водосборе (в мм слоя) рассчитывался как средневзвешенное значение из слоев осадков по отдельным высотным зонам:

$$X_{cp} = \sum_{i=1}^n X_i f_i / F, \quad (23)$$

где X_i — средние осадки отдельной высотной зоны (мм),
 F - площадь водосборного бассейна (км²),
 f_i - площадь высотной зоны (км²).

В расчете использованы данные о количествах атмосферных осадков метеостанции пос. Почтовый с учетом вертикальной зональности. Площади подсчитаны с использованием ГИС-технологий (табл. 9, табл. 25).

Таблица 25

Средние слои осадков в высотных зонах водосбора р.Бодрак

Средняя высота высотной зоны, м	Средний слой осадков в высотной зоне, мм	Площадь высотной зоны (f_i), км ²	Средний слой осадков на водосборе, мм
620	829	0,331	685 (672-706)
550	787	6,038	
450	727	26,399	
350	667	29,159	
250	607	12,085	
180	565	2,583	

Несмотря на то, что большее количество атмосферных осадков на изучаемой территории выпадает в теплый период эффективные осадки (идущие на питание подземных вод) выпадают в холодный период. Это объясняется тем, что ливневые осадки (осадки

интенсивностью $> 0,3 \text{ мм}$), которые характерны для летнего периода, дают стоковый эффект (они почти не идут на пополнение запасов подземных вод), кратковременные дожди расходуются главным образом на испарение, а вот обложные затяжные дожди холодного периода, напротив, интенсивно питают подземный сток. Для выяснения количества атмосферных осадков, формирующих сток, рассчитаны коэффициенты увлажнения для каждого месяца.

Началом гидрологического года можно считать 1 октября (когда запасы влаги переходящие из года в год минимальны) (табл. 26, рис. 41). С октября по март коэффициент увлажнения территории бассейна ≥ 1 . Осадки этого периода можно считать эффективными (т.е. формирующими подземный сток).

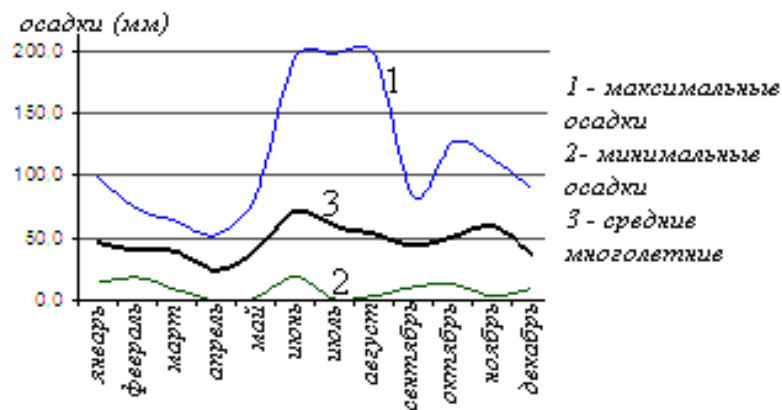


Рис. 41. Средние, минимальные и максимальные количества атмосферных осадков 1998-2009 гг.

Таблица 26

Коэффициент увлажнения в бассейне р. Бодрак

$K_{увл.}$	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
P/E_0	0,7	2,3	3,9	4,7	3,7	0,8	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4	0,4

При отсутствии осадков в течение длительного времени поверхности водосборов высыхают. В начале сезона осадков (октябрь-ноябрь) все выпавшие осадки уходят на первичное увлажнение поверхности водосбора и испарение (малые количества осадков полностью испаряются). Такое внутригодовое распределение сумм осадков предопределяет увеличение доли подземного питания реки в холодный период.

6.2. Испарение (Е)

Испарение – один из важнейших расходных элементов воднобалансовых расчетов. Существуют экспериментальные (основанные на натурных измерениях) и расчетные методы (основанные на теоретических расчетах и эмпирических связях с температурой и влажностью воздуха, интенсивностью солнечной радиации, скоростью ветра, альбедо испаряющей поверхности и т.п.). В данной работе для оценки суммарного испарения использованы расчетные методы.

Суммарное испарение включает: испарение с почвы и открытой воды, транспирацию листьями растений, испарение влаги, задержанной растительностью при выпадении осадков. Вниз по течению р. Бодрак со сменой ландшафта меняется и суммарное испарение.

Уравнения связи испарения с годовыми осадками (на основании анализа данных по водным балансам ряда водосборов) одними из первых предложили П. Шрайберг (1904 г.) и Э.М. Ольдекоп (1911 г.) [29, 32, 111, 155]. Э.М. Ольдекоп, анализируя кривую зависимости испарения от осадков, предложил следующее эмпирическое уравнение (рис. 42):

$$E = E_0 \operatorname{th} (P/E_0), \quad (24)$$

При максимальных количествах осадков и насыщенности воздуха испарение приближается к максимально возможному.

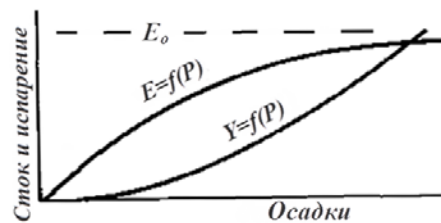


Рис. 42. Кривые зависимости стока (Y) и испарения (E) от осадков (P) при некоторых значениях испаряемости (E_0)

Формула П. Шрайберга (1904 г.), с использованием максимально возможного испарения, имеет следующий вид [155]:

$$E = P (1 - e^{-E_0/P}), \quad (25)$$

где P - годовые осадки, E_0 - испаряемость, E — испарение за год.

Испарение по методу Э.М. Ольдекопа составило 565 мм; по формуле Шрайберга около 485 мм (при испаряемости равной 843 мм) для средней высоты 380 м.

Французский исследователь Л. Тюрк (1961 г.), проанализировав данные 254 бассейнов различных континентов [157, 158], предложил эмпирическую зависимость, связывающую норму суммарного испарения (E) с нормой осадков (P):

$$E = P / \sqrt{0,9 + (P/E_0)^2}, \quad (26)$$

при условии $(P/E_0)^2 > 0,1$.

Испаряемость вычислялась по экспериментальным данным:

$$E_0 = 300 + 25T + 0,05T^3, \quad (27)$$

где T — среднегодовая температура воздуха.

По этой методике при $10,4^\circ\text{C}$: $E_0 = 616,2 \text{ мм}$; $E = 468,7 \text{ мм}$.

Внушительный ряд исследователей пытались определять испарение с помощью формул и графиков: Н.А. Багров (1954), М.И. Будыко (1952), П.С. Кузин (1950), Б.В. Поляков (1946), А.С. Конторщиков (1954), Э.И. Шихлинский (1969), В. Вундт (1937), А. Мейер (1928), К. Торнтвейт (1941), Р. Шрайбер (1904), Х.Л. Пенман (1948), П.О. Кузмин (1957), М.А. Колер (1959), А.Р. Константинов (1966) и др.

Графические связи суммарного испарения с температурой воздуха, осадками и влажностью воздуха предлагали П.С. Кузин, Б.В. Поляков, А.Р. Константинов и многие другие [17, 33, 79, 108].

Метод П.С. Кузина. Для определения испарения по методу П. С. Кузина используем графики зависимостей среднемесячных значений испарения от среднемесячных температур воздуха, представленные на рис. 43. Полученные среднемесячные значения испарения внесены в таблицу 27.

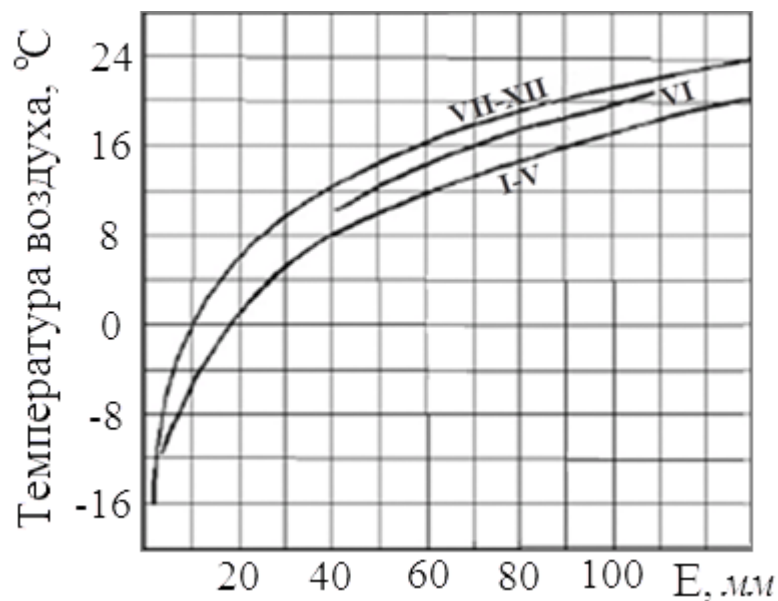


Рис. 43. График П.С. Кузина для расчета испарения

Годовое испарение определено как сумма среднемесячных значений: **$E = 602 \text{ мм}$** . Метод рекомендован для расчетов среднемноголетнего испарения с поверхности речного бассейна в районе достаточного увлажнения [88].

Таблица 27

Расчет испарения по методу П. С. Кузина

Alt 380 м	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	год
T°C	0,7	1,1	4,3	9,4	14,2	18,6	21,3	20,8	15,8	10,9	5,9	1,7	10,4
E, мм	20	20	30	47	76	92	90	95	52	32	20	11	585

Температуры приведены к средней высоте водосбора (380 м)

Метод Б.В. Полякова [135] основан на связи испарения с температурой воздуха и осадками. Сначала определяется месячное испарение с поверхности речного бассейна по графикам, учитывающим широтные зоны (рис. 44). Метод дает заниженные значения (при его обосновании использованы неисправленные величины измеренных осадков). Для расчета месячной величины испарения Б. В. Поляковым предложено уравнение $E_{\text{ср.мес.}} = f(T_{\text{ср.мес.}} \times P_{\text{ср.мес.}})$ и составлены графики. Результаты определения испарения методом Б. В. Полякова представлены в таблице 28. Годовое испарение получено из суммы среднемесячных значений и составило 685 мм.

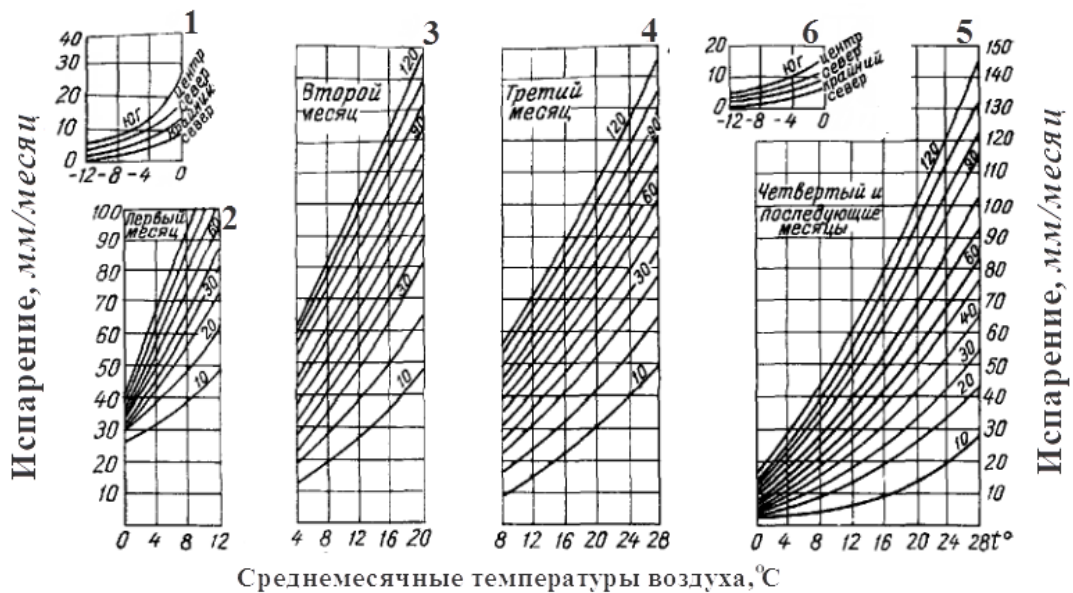


Рис. 44. График Б.В. Полякова для расчета нормы испарения с речных бассейнов

Таблица 28

Расчет испарения по методу Б.В. Полякова

Alt 380 м	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	год
T°C	0,7	1,1	4,3	9,4	14,2	18,6	21,3	20,8	15,8	10,9	5,9	1,7	10,4
P, мм	57,0	49,9	51,4	29,1	47,0	88,9	70,6	63,0	49,7	59,1	70,8	47,6	685
E, мм	38	23	27	12	30	74	62	56	36	28	20	8	414

Температуры и давления приведены к средней высоте водосбора (380 м)

Метод М. И. Будыко. При расчете месячного испарения с континентов широко используется комплексный метод М. И. Будыко, основанный на совместном решении уравнений теплового и водного балансов с учетом зависимости скорости испарения от влажности почвы. Режим испарения определяется метеорологическими условиями и состоянием подстилающей поверхности (норма испаряемости выражается через радиационный баланс увлажненной поверхности). Методы исследования М. И. Будыко [9, 29, 32] показали, что лучшие результаты достигаются при использовании среднего геометрического формул Шрайберга и Э. М. Ольдекопа.

Расчет средней годовой величины испарения методом М. И. Будыко удобно производить с использованием номограммы (рис. 45), которая выражает зависимость между коэффициентом испарения E/P и отношением годового радиационного баланса R к сумме тепла LP , затраченного на испарение осадков: $\frac{E}{P} = f\left(\frac{R}{LP}\right)$, где L — скрытая теплота испарения; R/LP — радиационный индекс сухости Будыко.

$$E = \sqrt{\frac{RP}{L} \operatorname{th} \frac{LP}{R} \left(1 - \operatorname{ch} \frac{R}{LP} + \operatorname{sh} \frac{R}{LP}\right)} \quad (28)$$

где th , ch , sh — гиперболические функции.

Поток радиационного тепла с учетом вертикальной поясности составляет примерно 122 ккал/см^2 , скрытую теплоту испарения принимаем $0,6 \text{ ккал}$; среднегодовую сумму осадков (с учетом высотного градиента) — 568 мм . В таком случае среднемноголетнее испарение составляет около 600 мм . Данный метод можно применять и для коротких периодов времени. Погрешность метода — $15 - 20 \%$.

Метод В. С. Мезенцева применяется для определения среднемноголетних месячных значений испарения. В методе используется испаряемость как эквивалент теплоресурсов испарения.

На основе модели водно-теплового баланса В. С. Мезенцева, адаптированной для территории Украины Н. С. Лободой на кафедре гидрологии суши Одесского научно-исследовательского гидрометеорологического института, разработаны методы определения годового испарения и испаряемости [26, 92, 128]. Годовая испаряемость для Украины учитывает суммы среднемесячных температур

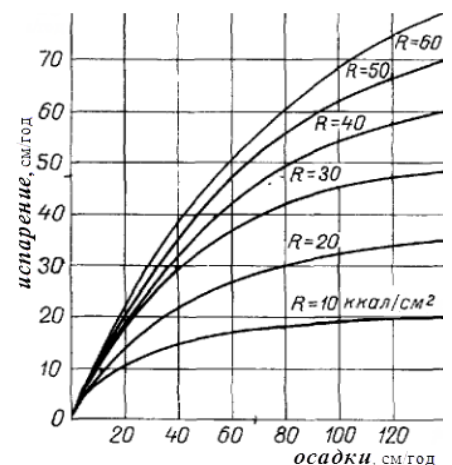


Рис. 45. Номограмма М.И. Будыко для определения испарения

за летний период с мая по сентябрь (когда преобладает антициклональный тип погоды с малой облачностью и слабыми ветрами). Для расчета испаряемости за год Н. С. Лободой и Е. Д. Гопченко предлагается формула, выражающая единую региональную зависимость между суммой среднемесячных температур воздуха за теплый период и годовыми значениями максимально возможного испарения:

$$E_o = 13,3 \sum_{v}^{ix} \bar{T} - 307, \quad (29)$$

где $\sum_{v}^{ix} \bar{T}$ — сумма средних температур (май – сентябрь) [26, 128].

Коэффициент уравнения линейной регрессии составил 0,94. На основании этого уравнения Н. С. Лободой и Е. Д. Гопченко (с использованием среднемноголетних данных) рассчитаны значения E_o [24, 118].

Для горных районов существует зависимость испарения от высотной поясности (с высотой увеличивается количество осадков и уменьшается испарение) и ориентации склонов (осадков выпадает больше на наветренных склонах). Для Горного Крыма (исключая юго-западное побережье) с использованием данных более 20 метеостанций получена расчетная связь высоты водосбора с нормой испаряемости ($R^2=0,921$) [128]:

$$E_o = 951 - 0,387(H - 100). \quad (30)$$

При средней высоте водосбора 380 м испаряемость составила 843 мм.

Для оценки суммарного испарения с поверхности водосбора использована формула В.С. Мезенцева:

$$E = E_o \left[1 + (P/E_o)^n \right]^{1/n}, \quad (31)$$

где n — параметр, учитывающий влияние расчлененности рельефа на формирование стока (для полугорных территорий $n = 3$) [26, 96].

После соответствующих вычислений получена величина испарения 568 мм (для средней высоты водосбора 380 м).

Все полученные с использование различных эмпирических зависимостей данные по расчету испарения сведены в таблицу 29.

Таблица 29

Значения испарений, полученные различными расчетными методами
для водосборного бассейна р. Бодрак

	Метод Ольдекопа	Метод Шрайберга	Метод Тюрка	Метод Кузина	Метод Полякова	Метод Будыко	Метод Мезенцева
Величина испарения, мм	565	485	414	585	455,4	600	568

Использованные методики основаны на различных подходах, обладают разной точностью, в каждой имеются свои недостатки и свои достоинства. Все полученные значения были рассмотрены. В итоге суммарное испарение с поверхности водосбора р. Бодрак оценено как 530 мм. Конечно, методы расчета испарения носят эмпирический характер и при их использовании необходимо проявлять известную осторожность.

Полученные значения суммарного испарения оказались несколько выше данных представленных в выпущенной в 2011 г. под редакцией профессора В.А. Бокова монографии [127], в которой для Бельбекско-Салгирского района испарение варьирует в диапазоне от 400 до 450 мм.

6.3. Конденсация (Z)

В подземных пустотах карбонатных карстующихся отложений, в трещинах пород, а также в поверхностных условиях в пределах расчлененного рельефа из туманов и росы происходит конденсация влаги, которая идет на питание подземных вод, образуя конденсационный сток.

В связи со сложностью и трудоемкостью количественного определения конденсации при балансовых расчетах многие исследователи считают, что учитывать ее нецелесообразно. Однако, при составлении водного баланса небольших речных бассейнов роль конденсации (особенно при наличии в разрезе карбонатных пород) может оказаться весьма ощутимой.

О карстовых явлениях Крыма существует достаточное количество публикаций, которые свидетельствуют о значительной роли конденсации в формировании общего стока в Горном Крыму. Наличие процессов конденсации на изучаемой территории подтверждает ряд малodeбитных, но постоянно действующих источников: г. Патиль (т. 105), Афениз (т. 107), Домик лесника (т. 102).

Известно, что лучшие условия для конденсации соответствуют периодам с большими суточными колебаниями температуры воздуха и почвы. На изучаемой территории максимальный перепад температур наблюдается в июле (особенно при длительных периодах жары), когда перепад температур (и особенно влажности) подземного воздуха и слоя приземного воздуха наибольший. На конденсационный сток также влияет объем зоны конденсации.

Для оценки процессов конденсации В.Н. Дублянский и Б.А. Вахрушев предлагают рассчитывать объемный модуль конденсационного стока [12], используя для расчета формулу В.Н. Оболенского:

$$Q = V * E * T * J * (e_{\text{пов.}} - e_{\text{подз.}}), \quad (32)$$

где: Q - количество конденсационной влаги, образующейся за год (г);

V - объем зоны конденсации, входящей в подземный водосборный бассейн (м³);

E - коэффициент трещинно-карстовой пустотности (доли или единицы процента);

T - продолжительность периода конденсации, *сутки* (в течение года);

J - коэффициент воздухообмена, *раз/сутки* (коэффициент показывает, сколько раз в сутки поверхностный воздух сменяет подземный в пустотах пород и почв);

$(e_{\text{пов.}} - e_{\text{подз.}})$ - разница влагосодержания поверхностного и подземного воздуха г/м³ или мм рт. ст.

В таблице 30 приведены данные оценки конденсационного стока Внутренней гряды Крымских гор, выполненной Б.А. Вахрушевым [12].

Таблица 30

Оценка конденсационного стока Внутренней гряды [12]

Площадь, км ²	Объем зоны конденсации, км ³	Конденсационный сток, мм	% от атмосферных осадков	Модуль конденсационного стока, л/с км ²	Объемный модуль конденсационного стока, л/с км ³
293,0	8,8	11	2,0	1,85	11,6

В бассейне р. Бодрак полого наклонные верхнемеловые и палеогеновые известняки и мергели, слагающие Внутреннюю гряду, занимают площадь около 30 км². На этой территории выпадает около 630 мм атмосферных осадков, таким образом конденсационный сток в этой части бассейна составляет примерно 13 мм, его роль велика, особенно в периоды длительных засух, когда динамические запасы подземных вод достигают полного истощения.

Однако большая часть бассейна р. Бодрак располагается в пределах Южного межгрядового понижения (рис. 21). Попробуем оценить конденсационный сток на этой территории, где хорошо карстующимися породами являются отложения нижнего мела, бронирующие вершины столовых гор (более 10 % территории водосборного бассейна) (рис. 46). Для этого используем данные дебитов родников г. Патиль в меженный период.

На г. Патиль имеются два родника, которые никогда не пересыхают (наблюдения за ними проводятся с 1998 г.). По составу родники пресные щелочные гидрокарбонатно-кальцевые (НСО₃ 88-95 %экв., Са 83-85 %экв.) с жесткостью около 5 мг-экв./л. Несмотря на то, что родник северо-западного склона г. Патиль находится в зоне развития флишевых отложений (Т₃-J₁tv), по его химическому составу понятно, что он формируется в карбонатных отложениях. Низкая минерализация (40-50 мг/л) свидетельствует о том, что область формирования стока родников находится близко от области разгрузки (т.е. вода источников не успевает насытиться солями).

Средний суммарный меженный расход родников г. Патиль примерно $40 \text{ м}^3/\text{сут.}$ Площадь бронирующего горизонта $K_1(v-h) \sim 0,35 \text{ км}^2$, мощность карстующихся отложений не более 17 м. На высотах 400 м (уровень плоской вершины г. Патиль) выпадает около 700 мм осадков в год. Общая площадь нижнемеловых отложений составляет примерно $8,5 \text{ км}^2$.

При условии, что процессы конденсации идут со второй половины апреля до первой половины октября все нижнемеловые отложения бассейна р. Бодрак обеспечивают примерно 1,5-2 мм конденсационного стока в год. Отложения палеогена и верхнего мела обеспечивают слой конденсации 13 мм. Суммарная конденсация с площади водосборного бассейна (за счет карбонатных пород палеогена, верхнего и нижнего мела) составляет слой около 7 мм в год.

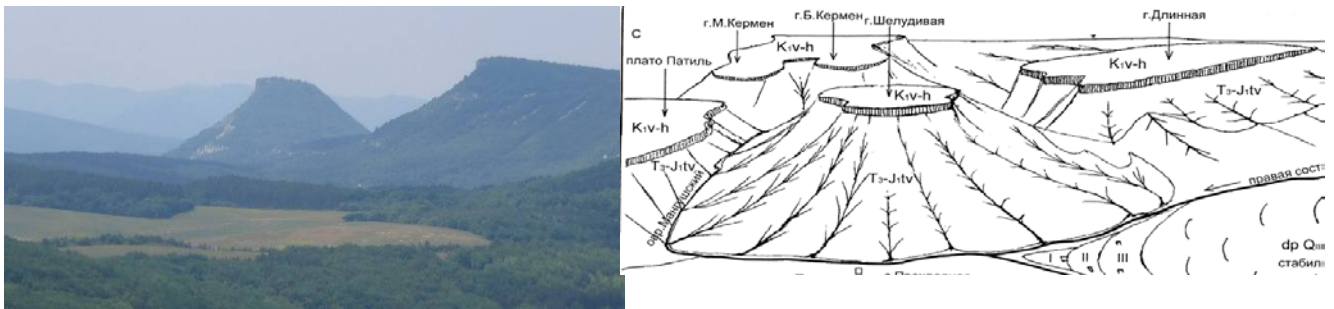


Рис. 46. Столовые горы в бассейне р. Бодрак

6.4. Сток реки Бодрак (Y)

6.4.1. Поверхностный сток

Речной сток формируется при взаимодействии климата, погоды, строения речных долин, средней высоты водосбора, различных антропогенных факторов. Первые попытки обобщения данных по среднегодовому стоку относятся к концу XIX в. - началу XX в.; исследования были направлены, как правило, на установление эмпирической связи среднегодового стока и среднегодовых осадков.

Общий речной сток объединяет поверхностный сток h (за счет осадков и снеготаяния) и подземный W (за счет грунтовых вод). Поверхностный сток складывается из склонового стока и руслового. В верховьях по площади развития водоупорных толщ глинистых сланцев таврической серии осуществляется транзитный сток дождевых вод. При переходе на площади развития мел-палеогеновых и далее неогеновых отложений наблюдаются выраженные участки поглощения стока (за счет карста). На р. Бодрак не редки явления, когда на смежных участках сосуществуют дренирование водоносных пород

и поглощение речного стока. Основную роль в бассейне играют дожди (снеговые и подземные воды имеют подчиненное значение). Временные водотоки (существующие в периоды дождей и некоторое время после) составляют существенную часть гидрографической сети.

В настоящее время изучением рек Крыма занимается Центр по гидрометеорологии республики Крым. На гидропостах проводятся измерения расходов воды и наносов, наблюдения за уровнями и температурой воды и т.п. Начало систематических наблюдений на крымских реках относится к 1913 г. Всего за время существования гидрометрической сети в Крыму был открыт 191 гидропост, однако расположены гидропосты крайне неравномерно – под наблюдением находились, главным образом, средние течения основных рек. В настоящий период гидрологическая сеть состоит из 34 гидропостов, к сожалению после 1987 г. результаты гидрометрических наблюдений не публикуются. Закрывание гидропостов, а значит и отсутствие гидрометрических данных, затрудняет оценку водных ресурсов.

На сайте Республиканского комитета республики Крым по водохозяйственному строительству и орошаемому земледелию была размещена некоторая информация о водных ресурсах Крыма. В частности о р. Бодрак имеются следующие сведения: средний расход воды - $0,10 \text{ м}^3/\text{сек.}$; средний объем стока - $3,15 \text{ млн.м}^3$ (при 50% обеспеченности); коэффициент вариации 0,36; максимальные расходы - $44,3 \text{ м}^3/\text{сек.}$ [120].

6.4.2. Подземный сток

Изучение речного стока, и особенно его составляющей - подземного стока, имеет огромное практическое значение на исследуемой территории, так как в летний период времени большая часть населения испытывает трудности с водоснабжением. В бассейне р. Бодрак находятся несколько населенных пунктов, также в летний период в д. Трудолюбовку и д. Прохладное приезжают студенты различных учебных заведений России, Украины и зарубежья для прохождения геологической практики на уникальном геологическом полигоне (плюс просто отдыхающие). Не менее 5000 человек в летний период времени проживает на территории бассейна р. Бодрак.

Оценку подземного стока обычно решают по имеющимся картам распределения или методом построения гидрографа речного стока с выделением на графике подземной составляющей, которая характеризует величину естественных ресурсов подземных вод [15, 17, 42, 87, 93, 96, 117].

Методы, используемые в данной работе, выбирались с учетом того, что полевые исследования проводятся только в летний период. Сток осуществляется трещинно-грунтовыми водами, формирующимися в зоне выветривания коренных пород, некоторая часть стока обеспечивается процессами конденсации в карбонатных породах. Разгрузка подземных вод в реку равна общему подземному стоку или меньше его. Подземный сток динамичен и имеет сезонный режим.

6.4.2.1. Оценка подземного стока по дебитам источников

Внутригодовой режим подземного стока р. Бодрак близок к режиму родников, находящихся в его бассейне (рис. 47). Режим речного стока, уровни подземных вод и подземных притоков в р. Бодрак повторяют ход атмосферных осадков (с некоторым временным отрывом).

Ф.А. Макаренко [94] выделил критерий количественной оценки подземного притока в реки, установив, что изменение режима подземного стока в реки тесно коррелирует с режимом родников, питающихся за счет верхней, дренируемой реками, части гидрогеологического разреза – зоны свободного водообмена; при этом кривая суммарного дебита родников на площади соответствует кривой режима стока верхней зоны в реку.

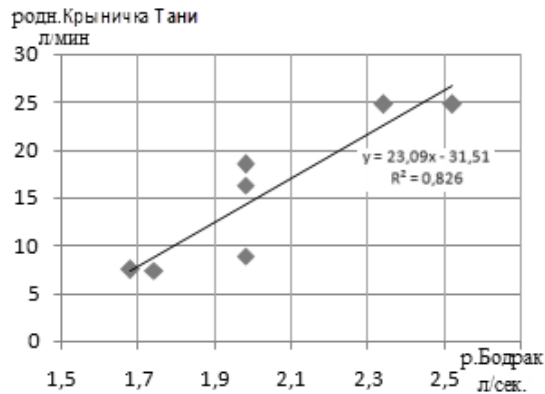


Рис. 47. Связь расходов р.Бодрак и родн. Крыничка Тани (лето 2005 г.)

Естественные ресурсы подземных вод по среднегодовому родниковому стоку характеризуют минимальную величину естественных ресурсов подземных вод зоны активного водообмена в пределах выше базисной поверхности. Расход подземного потока:

$$Q_{p.} = \sum_{i=1}^n q_i, \quad (33)$$

где q_i – дебит, n - количество родников.

В части бассейна р. Бодрак до створа д. Трудолюбовки (водосбор 44 км²) функционирует более 30 родников, большинство из них мелкие. Самым крупным является источник «Вербочки» (который используется для организации централизованного водоснабжения д. Прохладное). В летний период с 1998 г. по настоящее время производятся измерения дебитов родников; несмотря на то, что измерения эти неравномерны, были использованы имеющиеся усредненные данные. Общий суммарный средний меженный родниковый сток (до створа д. Трудолюбовки) оценивается в 600 м³/сут., причем больший приток дает левобережная часть водосборной площади (в 6 раз), что связано с большими площадями распространения карстующихся карбонатных пород. В таком случае подземный сток части бассейна до створа в д. Трудолюбовке составляет слой около 5 мм/год. Метод позволяет оценить лишь часть разгрузки подземных вод.

6.4.2.2. Метод меженных гидрометрических съемок

Метод определения подземного стока по многолетним данным о межennom речном стоке (оценка естественных ресурсов подземных вод по расходу реки в межень) введен в использование А.З. Амусья в 1975 г. [86, 126] (по данным Б.И. Куделина в России метод впервые применен Е.А. Гейнцем).

Минимальный сток формируется, когда поверхностный сток полностью прекращается (отсутствует снеговое и дождевое питание) и река переходит на подземное питание за счет вод зоны активного водообмена. Несмотря на то, что это приближенная характеристика подземного стока реки, и точное определение подземного стока по минимальному невозможно, так как даже при отсутствии снегового питания абсолютный минимум всегда меньше подземного стока (он лишь характеризует наиболее устойчивую часть подземного стока), тем не менее данный метод широко применяется. Когда поверхностного стока нет длительное время, запасы подземных вод могут истощиться и река полностью пересыхает. На р. Бодрак практически каждый летний сезон минимальный сток равен нулю, но это не означает, что подземный сток отсутствует. В пойме и низких надпойменных террасах неглубокими колодцами вскрываются воды аллювиальных отложений (глубина до воды около 0,8 - 1 м, дебит 1-2 л/сек.).

В те года, когда имелась возможность, измерялись расходы как р. Бодрак, так и ее притоков. На рис. 48 и в таблице 31 представлены данные, полученные в ходе полевых работ летом 2005 г.; на графике (рис. 48) показано изменение расхода вверх по течению р. Бодрак. На графике хорошо выделяется пик, который возникает после поступления вод из Московского оврага, где располагается самый крупный источник бассейна р. Бодрак

«Вербочки». Область питания источника «Вербочки» находится в зоне развития карбонатных пород нижнего мела, к тому же овраг имеет большую водосборную площадь и достаточную толщину аллювия.

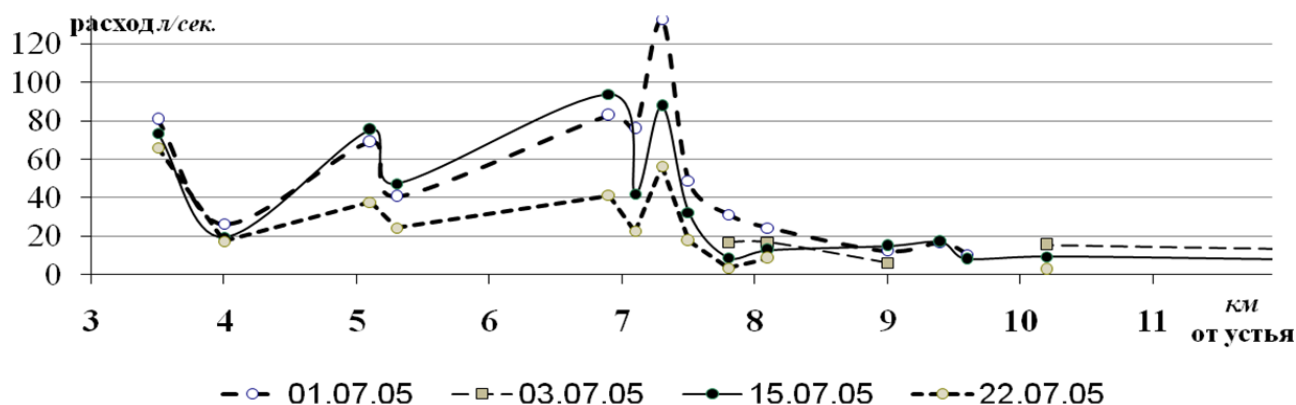


Рис. 48. Изменение расхода р. Бодрак по течению реки (июль 2005 г.)

Таблица 31

Изменение расхода р. Бодрак (л/сек.) вверх по течению реки

река Бодрак	расстояние от устья км	дата измерений			
		01.07.05	03.07.05	15.07.05	22.07.05
у Большого моста	3,5	80,5		73,4	65,9
у моста в Старом поселке	4	26,25		19,58	17,4
после ручья из овра.Баклинский	5,1	68,75		75,3	37,5
до ручья из Баклинского оврага	5,3	40,47		47,2	24,28
после Ленинградского оврага	6,9	82,8		93,7	41,2
у водокачки д.Трудолюбовки	7,1	75,8		41,9	22,5
после ручья из овра.Московский	7,3	132,3		87,5	56,4
до ручья из Московского оврага	7,5	48,7		32,4	17,6
у Тещинового моста	7,8	31,2	16,9	8,9	3,4
у р. Крыничка Тани	8,1	24,17	16,9	12,7	8,56
брод у Керменов	9	12,2	6	15	
после ручья из овра.Мангушский	9,4	16,6		17	
до ручья из Мангушского оврага	9,6	10,46		8	
у Карьерного оврага.	10,2		15,5	9,2	2,6
после Длинного оврага.	12,1		13	7,9	

Устойчивый подземный сток в межень – гарантированный минимум естественных ресурсов подземных вод речного бассейна. Характерная особенность крымских рек – прерывистость стока вследствие пересыхания в меженный период, что вызвано как природными условиями, так и высокой антропогенной нагрузкой в летний период времени.

Р. Бодрак в конце июля обычно пересыхает. На рис. 49 и табл. 32 показаны изменения расходов р. Бодрак в июле 2005 г., где (несмотря на неполноту измерений) хорошо заметна динамика уменьшения расхода. Это был благоприятный год для измерений расходов (в июне выпала двойная норма осадков).

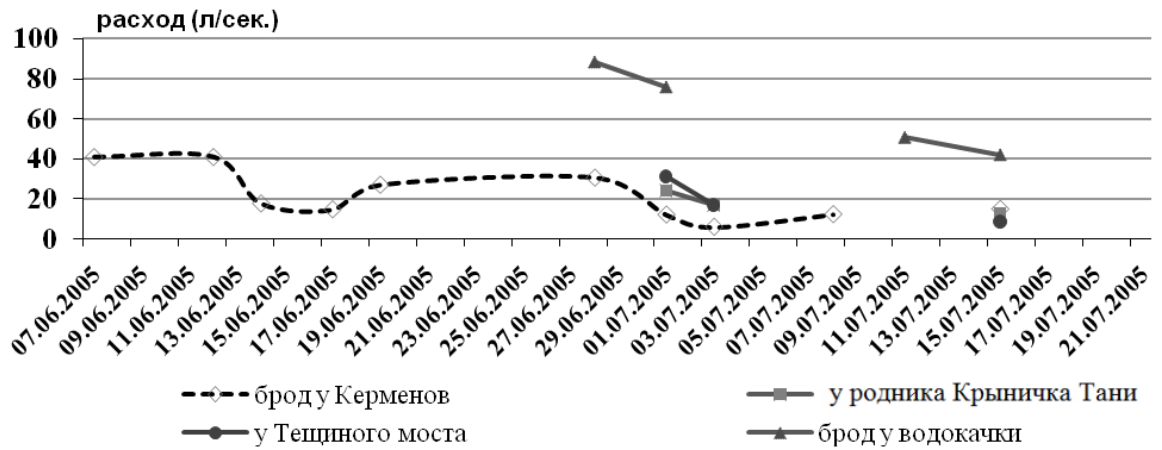


Рис. 49. Изменение расхода р. Бодрак в летний сезон 2005 г.

Таблица 32

Изменение расходов р. Бодрак (л/сек.), лето 2005 г.

Точка опробования реки Бодрак	07 июня	12 июня	14 июня	17 июня	19 июня	28 июня	01 июля	03 июля	08 июля	11 июля	15 июля	17 июля	22 июля
г. М. Кермен	41,2	41,2	17,8	14,8	27,2	30,8	12,2	6	12,4		15		
у родника Пост. двор							24,17	16,9			12,7		8,56
Тещин мост							31,2	16,9			8,9		3,4
у водокачки						88,3	75,8			50,6	41,9		22,5

Несколько раз производились полевые исследования притоков воды в водозабор д. Трудюлюбовки. Рассмотрим два характерных обследования: с полностью пересохшим руслом р. Бодрак и в многоводный год лета 2005 г. Водозабор д. Трудюлюбовки располагается в аллювии на правом берегу р. Бодрак и представляет собой резервуар (глубиной 4,5 м и площадью 45,5 м²), куда поступает вода из подруслового потока и родников. В процессе исследования измерялись дебиты источников и скорость притока воды в резервуар после откачки с последующим вычислением расходов (табл. 33).

В 2009 г в июне выпало 34,1 мм осадков, а в 2005 г. – 144,2 мм, причем годовая сумма осадков в предшествующий год в первом случае была ниже среднемноголетней нормы, во втором – наоборот выше. К тому же накануне проведения измерений 16.07.2005

выпало около 36 мм осадков (по данным метеостанции пос. Почтовый). Это объясняет, почему в 2005 г. родниковый сток почти втрое выше, чем в 2009 г., и почему в 2005 г. приток за счет подруслового потока выше в 50 раз! (табл. 33).

Таблица 33

Расчет притоков воды в водозабор д. Трудолюбовки

	17.07.2005 г.	24.07.2009 г.
Родниковый сток	259 м ³ /сут.	97 м ³ /сут.
Q резервуара	657 м ³ /сут.	105 м ³ /сут.
Приток за счет подруслового потока	398 м ³ /сут.	7,7 м ³ /сут.

Мощность аллювиальных отложений р. Бодрак на участке от Московского оврага до Баклинского оврага около 4-6 м. Водовмещающие породы: прослой песка, гальки, валунно-галечные и гравийные накопления в толщах суглинков и глин. Коэффициент фильтрации ~ 2,5 – 3 м/сут. (по литературным данным). При длине участка – 1,5 км и разнице абсолютных отметок подземных вод на границах участка – 30 м, напорный градиент $I = 0,02$. Мощность подруслового потока – около 2-3 м (мощность аллювиальных отложений минус расстояние от поверхности земли до воды в колодцах), ширина аллювиальных отложений около 300 м. Тогда расход подруслового потока в межень, рассчитанный по формуле $Q_{\text{подрусл.}} = k_f \cdot I \cdot F$, составит около 60 м³/сут. Данный расчет сделан в 2007 г.

Попутно был оценен подземный поток, приуроченный к зонам экзогенной трещиноватости вулканогенно-осадочной толщи (на которой располагается центр д. Трудолюбовки). По данным уровней в колодцах построена карта гидроизогипс участка (рис. 50). Здесь колодцы более глубокого заложения, чем в аллювиальных отложениях. Экзогенная трещиноватость (распространяясь на глубину примерно 20-30 метров) постепенно затухает, образуя региональный водоупор.

Мощность слоя воды в колодцах в меженный период в среднем около 2-3 м. Максимальные величины напоров (до 330 м) отмечены на восточном участке, у реки напоры изменяются от 220 до 240 м, достигая минимума (220 м) в северо-западной части участка (рис. 50). Уклон потока имеет юго-западное направление, инфильтрационные воды разгружаются в реку. На участке распространения вулканогенно-осадочной толщи (J_2b) гидравлический градиент - около единицы. Если коэффициент фильтрации задать равным 1 м/сут., единичный расход составит примерно 2,5 м²/сут.

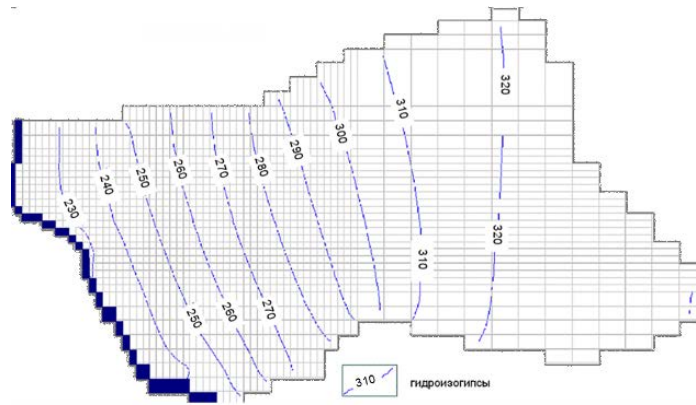


Рис. 50. Распространение гидроизогипс в вулканогенно осадочной толще (2004 г.)

Когда р. Бодрак пересыхает, значительно снижаются родниковый сток и расход подруслового потока. Вышеизложенное показывает, что меженный сток выступает как показатель подземного стока, однако применять данный метод для оценки подземного стока р. Бодрак не представляется возможным. В таких случаях обычно используют метод гидрологических аналогий (по сути – это вариант метода гидрометрических съемок), при этом используется река-аналог. Минимальный расход определяется по литературным данным с учетом переходных коэффициентов. В качестве реки-аналога могла бы выступить р.Альма (гидрометрические данные которой представлены в различных справочниках), однако эта река серьезно зарегулирована.

6.4.2.3. Гидрохимический метод

Метод основан на отличиях химического состава подземных и поверхностных вод [17, 80, 108], используется для оценки подземного питания рек. В основе данного метода лежат гидрохимические наблюдения.

Подземный сток определяется путем решения системы уравнений:

$$Q_r = Q_{\text{подз.}} + Q_{\text{пов.}} \quad (34)$$

$$c_r \cdot Q_r = c_{\text{подз.}} \cdot Q_{\text{подз.}} + c_{\text{пов.}} \cdot Q_{\text{пов.}}, \quad (35)$$

где Q_r — годовой объем речного стока;

$Q_{\text{подз.}}$ — годовой объем подземного стока;

$Q_{\text{пов.}}$ — годовой объем поверхностного стока;

c_r — концентрация или минерализация к.-л. компонента в речной воде;

$c_{\text{подз.}}$ — концентрация или минерализация к.-л. компонента в подземном стоке;

$c_{\text{пов.}}$ — концентрация или минерализация к.-л. компонента в поверхностном стоке.

Определения проводятся в устойчивую межень, когда река питается преимущественно подземными водами. Решая систему уравнений, получим:

$$Q_{\text{подз.}} = Q_r (c_r - c_{\text{пов.}}) / (c_{\text{подз.}} - c_{\text{пов.}}). \quad (36)$$

Увеличение минерализации воды (или концентрации какого-либо компонента) отвечает уменьшению расходов воды, и, следовательно, увеличению роли подземного питания. Во вторую половину июля 2005 г. не было осадков. Попробуем использовать данный метод для этого периода.

В качестве расчетных показателей для оценки подземного стока выбраны концентрации хлора и гидрокарбонатов в речных, подземных и поверхностных водах и их удельная проводимость:

$$Q_{\text{подз. (по Cl)}} = Q_p (0,75, -0,7)/(1,36, -0,7); \quad Q_{\text{подз.}} = 0,1 Q_p. \quad (37)$$

$$Q_{\text{подз. (по HCO}_3)} = Q_p (5,4, -3,9)/(7,6, -3,9); \quad Q_{\text{подз.}} = 0,4 Q_p. \quad (38)$$

$$Q_{\text{подз. (по УЭП)}} = Q_p (0,7, -0,5)/(1,0, -0,5); \quad Q_{\text{подз.}} = 0,4 Q_p. \quad (39)$$

В створе д. Трудолюбовки расход р. Бодрак, измеренный 22.07.2005, составил 22,5 л/сек. (1944 м³/сут.), если примем $Q_{\text{подз.}} = 0,3 Q_p$, то подземный сток составит 5 мм/год (для водосборной площади 44 км²).

6.4.2.4. Морфометрический способ изучения подземного стока

Начало применения морфометрических методов связано с именами А.В. Стрельбицкого (1930 г.), Б.Д. Зайкова (1933 г.), Н.И. Егорова и В.Н. Ченцова (1940 г.). Впервые зависимость стока от высоты речных бассейнов установил известный гидролог Б.Д. Зайков для трех районов Армении (1933 г.). В 1948 г. морфометрические методы получили новый уровень развития в работах Н.М. Волкова, который в институте географии РАН защитил докторскую диссертацию «Измерения по картам площадей и протяженности географических объектов». Также изучениями морфометрических зависимостей в горных районах занимались – В.К. Давыдов, Л.А. Владимиров, М.И. Львович и многие другие [15, 29, 93], в Горном Крыму - А.Н. Олиферов [110].

Морфометрические методы, основанные на анализе рельефа речных бассейнов, широко используют в слабоизученных районах [15, 92, 93, 108]. При недостатке гидрометрических наблюдений в бассейне р. Бодрак данные методы могли бы позволить устанавливать зависимости стока от морфометрических характеристик водосбора эмпирическим путем.

Примером эффективного применения морфометрического метода при оценке подземного стока для практических целей послужили работы А.И. Зеленого в условиях горного Мяо-Чана и смежных с ним участков. А.И. Зеленым была выявлена тесная (близкая к функциональной) зависимость между высотными параметрами речных водосборов и средними отметками продольного профиля речных русел, которая представляет

математическое выражение типовых условий дренирования междуречных массивов различных порядков в различных геологических, структурных и гидрогеологических обстановках (рис. 51) [43, 44]. Зависимость между высотными параметрами речных водосборов ($H_{\text{в}}$) и средними отметками продольного профиля речных русел ($h_{\text{р}}$), выявленная А. И. Зеленым, выглядит следующим образом:

$$H_{\text{в.}} = -0,00085 h_{\text{р.}}^2 + 2,09 h_{\text{р.}} - 54, \quad (40)$$

Выведенные зависимости дают возможность сделать количественную оценку подземного стока на других слабоизученных территориях. Фиксируя единство условий дренирования бассейнов разного высотного положения ($H_{\text{в.}} = 170 - 1300$ м) и разных площадей ($F = 1 - 41000$ км²) в пределах обширной территории, зависимость $H_{\text{в.}} = f(h_{\text{р.}})$ позволяет подойти к количественной оценке условий дренирования ассоциаций речных водосборов [43, 44]. Параметром такой оценки может служить средняя мощность эрозионного вреза как средняя мощность зоны дренирования в речном бассейне:

$$H_{\text{з.д.}} = H_{\text{в.}} - h_{\text{р.}}, \quad (41)$$

где $H_{\text{в.}}$ – средняя высота речного водосбора, $h_{\text{р.}}$ – средняя отметка профиля речного русла.

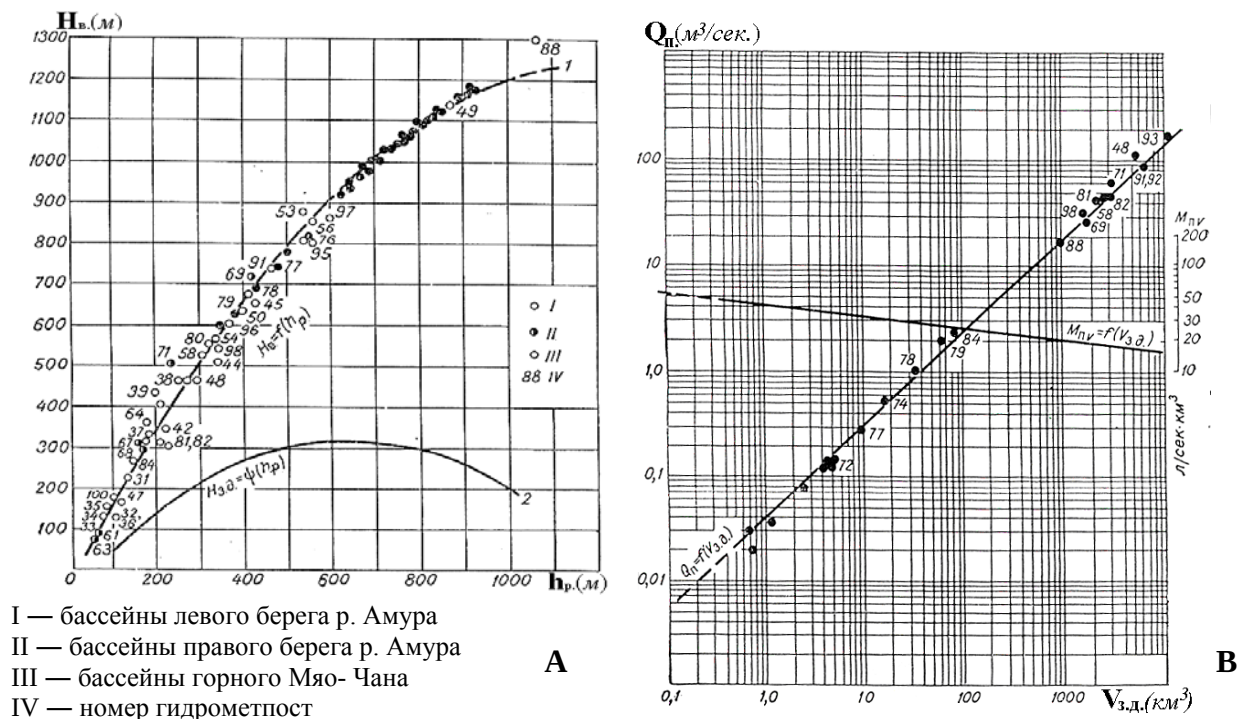


Рис. 51. Зависимости для рек Нижнего Приамурья (А. И. Зеленой, 1969 г.) [43, 44]:

A — между средней высотой водосборов ($H_{\text{в.}}$) и отметками профиля русел ($h_{\text{р.}}$);

B — нормы подземного стока в реки ($Q_{\text{п}}$) от объема дренируемой части ($V_{\text{з.д.}}$).

Эмпирическая кривая $H_{\text{з.д.}} = \psi(h_{\text{р.}})$ соответствующая уравнению $H_{\text{з.д.}} = H_{\text{в.}} - h_{\text{р.}}$ на рис. 51 Б характеризует связь мощности зон дренирования в речных водосборах и средних

отметок речных русел (площадей бассейнов); $H_{з.д.}$ достигает максимальных значений в горных районах, снижаясь к верховьям рек.

Кривая $H_{з.д.} = \psi(h_p.)$ близка к функции гиперболического тангенса, входящего в расчетную формулу подземного питания рек (А.Н. Бефани):

$$Q_{п.} = v \operatorname{th} [a_r (F_i/F - 1)^\varepsilon], \quad (42)$$

где v - норма инфильтрации (мм);
 F – площадь речного бассейна в (км²);
 F_i - средняя площадь истоков реки (км²);
 a_r - параметр, зависящий от гидрогеологических условий;
 ε - параметр, учитывающий интенсивность нарастания подземного питания по мере роста эрозионного вреза.

Такие формулы используются для гидрогеологически изученных бассейнов. Используя зависимость $H_{з.д.} = \psi(h_p.)$, А.И. Зеленой определил объем дренирования речных водосборов разных высотных зон:

$$V_{з.д.} = H_{з.д.} * F = (H_{в.} - h_{р.}) F = \sum f_i h_i (1 - h_{р.}/H_{в.}), \quad (43)$$

где $\sum f_i h_i$ - объем бассейна (км³);
 $V_{з.д.}$ - объем дренируемой зоны бассейна (км³).

Применяя это равенство, А.И. Зеленой выявил важную зависимость между нормой подземного стока ($Q_{п.}$) и объемами дренируемых реками зон ($V_{з.д.}$), выражающуюся формулой:

$$Q_{п.} = 0,0397 * V_{з.д.}^{0,894}. \quad (44)$$

График на рис. 51 В может служить основой для массовых расчетов величины подземного стока на аналогичных по геолого-гидрогеологическим условиям территориях.

Территории Приамурья и изучаемого района имеют некоторые общие черты - в питании рек Приамурья также основную роль играют воды дождевых осадков (около двух третей стока). В обоих районах количество осадков регулирует речной сток и на их изменение определяющее влияние оказывают циркуляционные процессы в атмосфере, в обоих районах горы играют важную роль в экранировании осадков. Велик диапазон колебания стока: от полного отсутствия до катастрофических паводков. Дожди вызываются циклонами и являются основной причиной формирования значительных паводков. В обоих районах существует крайне неравномерное и неустойчивое (сильно меняющееся из года в год) внутригодовое распределение стока. Подземное питание реки Бодрак осуществляется также за счет трещинно-грунтовых вод. Но существуют и серьезные отличия: количество

выпадающих осадков и абсолютные отметки гораздо выше в Приморье, чем в изучаемом районе. Тем не менее, при изучении морфометрических характеристик рек западного склона Крымских гор (по данным [121, 122]), выяснилось, что все они ложатся на кривую зависимости между средней высотой водосборов ($H_{в.}$) и отметками профиля речных русел (h_p) А.И. Зеленого (рис. 51 А).

Используя зависимость на рис. 51 В и, получим величину подземного стока р. Бодрак, которая составила $9460800 \text{ м}^3/\text{год}$ с площади **$76,53 \text{ км}^2$** :

$$V_{з.д.} = 0,130 * 76,5 = 10 \text{ км}^3. \quad (45)$$

То есть слой стока по методу А.И. Зеленого на изучаемой территории - **124 мм/год** . Величина для Крыма впечатляющая!

Чтобы разобраться в полученных цифрах, была найдена связь меженного стока и объемов зоны дренирования в зависимости от высотной отметки профиля речного русла для рек западного склона Крымских гор. Были вычислены объемы зон дренирования для основных рек северо-западного склона Крымских гор по данным, имеющимся в справочниках по ресурсам поверхностных вод СССР [121, 122] (табл. 34). Средняя отметка профиля речного русла (h_p) определялась по формуле:

$$h_{p,i} = L_i * \cos(i_i/1000)/2, \quad (46)$$

где L_i – длина от пункта наблюдения до наиболее удаленной точки реки;
 i_i – средневзвешенный уклон от пункта до наиболее удаленной точки.

Так как устойчивый речной сток в межень осуществляется за счет подземных вод, примем данные по меженному стоку основных рек северо-западного склона за гарантированный минимум подземного стока. Зависимость подземного стока от объема зоны дренирования оказалась не существенная (рис. 52). Подсчитав подземный сток для рек северо-западного склона методом А.И. Зеленого (табл. 34), убеждаемся, что эти значения получаются завышенными.

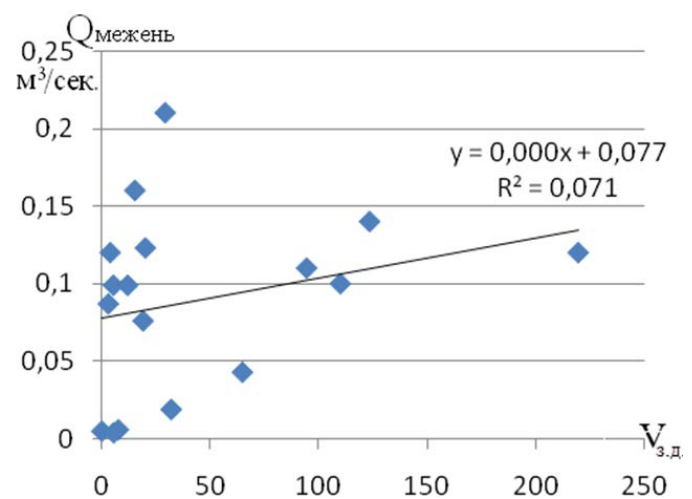


Рис. 52. Связь меженного стока с объемом зоны дренирования

Таблица 34

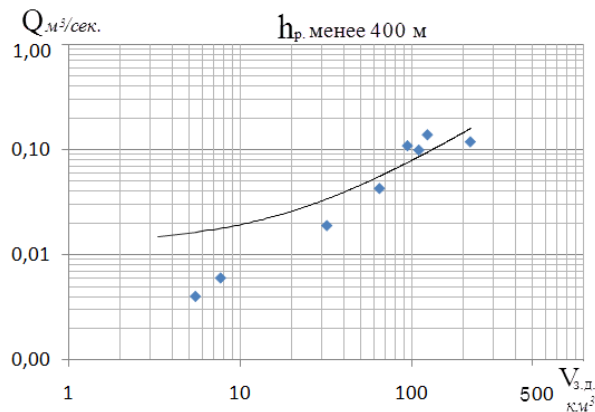
Зависимость меженного стока от морфометрических характеристик
для основных рек западного склона Крымских гор

Название реки	Пункт наблюдения	Средняя отметка профиля русла, м	Средняя высота водосбора м	Отметка пункта м	Расстояние до наиболее удаленной точки, км	Уклон от удаленной точки средневзв. ‰	Средний расход в межень, м ³ /сек.	Площадь водосбора, км ²	Объем зоны дренирован ия V _{з.л.}	Q по зависимости А.И.Зеленог о	Q _{по А.И.Зел./} Q _{межень}	поправочный коэффициент к зависимости А.И.Зеленого
Бельбек	с.Фруктовое	234,82	680	9,7	56	8,04	0,12	493	219,47	4,92	41,0	34
Альма	с.Красноармейское	318,97	500	34	69	8,26	0,1	607	109,89	2,65	26,5	
Черная	с.Чернореченское	330,62	520	14,42	34	18,6	0,043	342	64,77	1,65	38,4	
Кача	с.Комсомольское	345,1	580	19,6	62	10,5	0,14	525	123,32	2,94	21,0	
Марта	с.Верхоречье	359,15	460	229,95	19	13,6	0,006	76	7,66	0,25	40,9	
Бельбек	п.Куйбышево	380,59	730	145,69	27	17,4	0,11	270	94,34	2,31	21,0	
Альма	п.Почтовое	413,48	520	187,98	41	11	0,019	300	31,96	0,88	46,2	3
Альма	с.Карагач	459,43	540	238,93	35	12,6	0,123	249	20,06	0,58	4,7	
Черная	с.Родниковское	480,13	730	255,13	12	37,5	0,099	47,6	11,89	0,36	3,7	
Черная	у г.Кизил-Кая	503,29	600	217,34	19	30,1	0,076	197	19,05	0,55	7,3	
Кача	с.Баштановка	509,12	600	156,32	36	19,6	0,21	321	29,17	0,81	3,9	
Кача	с.Загорское	661,42	800	306,52	21	33,8	0,16	110	15,24	0,45	2,8	
Альма	госзаповедник	675,46	810	457,71	13	33,5	0,099	39,7	5,34	0,18	1,8	
Бельбек	с.Счастливое	751,45	840	361,45	7,5	104	0,12	44	3,90	0,13	1,1	
Стиля	с. Лесниково	861,74	870	458,94	7,6	106	0,005	8,8	0,07	0,00	0,8	
Коккозка	с.Голубинка	873,92	910	207,92	18	74	0,087	83,6	3,02	0,11	1,2	

Примечание: таблица составлена по материалам сборников [121, 122]

Расположив характеристики основных рек северо-западного склона по возрастанию отметки профиля русла, замечаем, что существует хорошая зависимость меженного стока от объемов зон дренирования для двух групп – с высотной отметкой профиля русла больше 400 м и меньше 400 м (табл. 34, рис. 53).

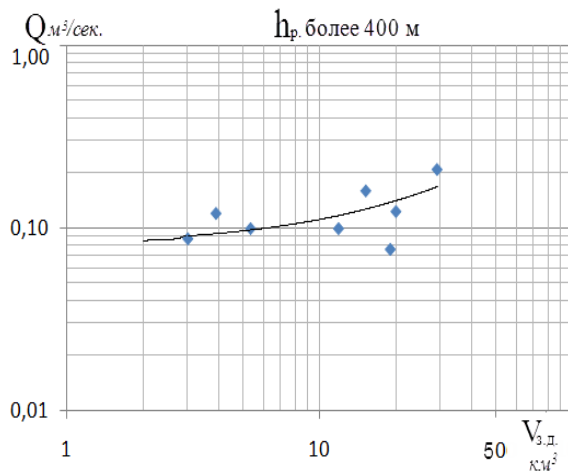
Для 1 группы рек и водотоков ($h_p < 400$ м) подземный сток, посчитанный по зависимости А.И.Зеленого, оказался примерно в 30 раз выше реального. Для 2 группы рек ($h_p > 400$ м) – в 3 раза. Подземный сток для рек и водотоков северо-западного склона на высотах более 400 м в 10 раз выше, чем на высотах менее 400 м. Это объясняется тем, что в 1 группу вошли реки и водотоки северо-западного склона (или участки среднего течения основных рек) почти лишенные карстового питания и пересыхающие в межень. Во 2 группу – реки и водотоки, области питания которых находятся на территориях развития карстующихся карбонатных пород. Река Бодрак относится к 1 группе (рис. 53). Применяв зависимость А.И.Зеленого с поправочным коэффициентом, получим модуль подземного стока равным $0,01 \text{ м}^3/\text{сек. км}^2$ (или 4 мм слоя в год).



$h_p \text{ менее } 400 \text{ м}$

$$y = 0,0007x + 0,0128$$

$$(R^2 = 0,740)$$



$h_p \text{ более } 400 \text{ м}$

$$y = 0,003x + 0,080$$

$$(R^2 = 0,705)$$

Рис. 53. Связь меженного стока и объемов зоны дренирования в зависимости от высотной отметки профиля речного русла для рек северо-западных склонов Крымских гор

6.4.2.5. Сравнение результатов оценки подземного стока

Подземные воды бассейна р. Бодрак круглый год обеспечивают питание реки, даже в те периоды, когда поверхностный сток полностью отсутствует. Пересыхание реки затрудняет оценку подземного стока гидрометрическим методом, однако с помощью этого метода мы можем судить о влиянии на подземный сток метеорологических параметров – температуры и количества атмосферных осадков. Гидрометрическая съемка показала, что естественные ресурсы подземных вод в бассейне р. Бодрак чрезвычайно зависят от метеорологических факторов и подземный сток крайне неустойчив.

В таблице 35 представлены результаты оценки подземного стока, полученные разными методами. Основная отрицательная черта проведенных исследований - их сезонность (при изучении подземного стока в реки для оценки естественных ресурсов необходимо использовать среднегодовые значения), положительная - простота и дешевизна примененных методов.

Считается, что метод оценки по дебитам источников позволяет учесть только часть разгрузки подземных вод (лишь его родниковую составляющую) и слой подземного стока, полученный этим методом, будет выше 5 мм/год. Однако, изучаемый водосборный бассейн находится в области активного водообмена, и зона замедленного водообмена играет подчиненную роль в формировании речного стока. По материалам гидрохимической съемки подземное питание р. Бодрак составляет 5 мм слоя в год, морфометрический метод дает нам 4 мм слоя в год, (табл. 35).

Таблица 35

Сравнение результатов оценки подземного стока

	Оценка по дебитам источников	Метод меженных гидрометрических съемок	Гидрохимический метод	Морфометрический метод
Слой подземного стока (мм/год)	>5	-	5	4

6.5. Водный баланс бассейна р. Бодрак

Для современных методов определения элементов водного баланса, как правило, необходим большой объем метеорологических, гидрологических, гидрогеологических данных, что связано с определенными трудностями и материальными затратами на проведение трудоемких дорогостоящих полевых работ, что для малых рек редко оправдано. Предложенные в данной работе методы оценки элементов водного баланса бассейна малой реки, протекающей на территории с недостаточным увлажнением, опираются на минимум стандартной информации. Базируясь на вышеизложенные материалы, построим уравнение водного баланса бассейна р. Бодрак (данные представим в мм слоя (табл. 36)).

Речной сток как составляющая водного баланса (40 мм слоя) получен с привлечением материалов сайта Республиканского комитета республики Крым по водохозяйственному строительству и орошаемому земледелию [120] (где размещены объемы стока большинства рек Крыма) путем деления объема стока р. Бодрак на площадь речного бассейна (3,15 млн. м³/76,5 км²).

По гидрохимическому методу и общему суммарному среднему меженному родниковому стоку (для водосборной площади 44 км² до створа д. Трудолюбовки) подземный сток в реки составил 5 мм слоя. Применив морфометрический способ расчета А.И.Зеленого с поправочным коэффициентом 3 [53, 58] получили 4 мм слоя.

Некоторое количество пресной воды на водосборе р. Бодрак зарегулировано в ставках. По нашим оценкам общий объем этих вод составляет 1211 тыс. м³ (или 5 мм слоя). На испарение тратится около 525 мм слоя атмосферных осадков (гл. 6.2).

Некоторое количество влаги тратится на инфильтрацию (склоновый сток, инфлюацию и т.п.), вероятно значительная часть подземных вод разгружается скрытно. Оценить эти траты не представляется возможным. Рассмотрев уравнение водного баланса, понимаем, что на инфильтрацию должно идти не меньше 122 мм слоя (с учетом того, что нам не известно, сколько мм приходится на притоки подземных вод):

$$i = (P + Z + T) - (E + h + W + s) = (685 + 7 + T) - (525 + 36 + 4 + 5) \geq 122 \text{ мм (табл. 36)}. \quad (47)$$

Подземные притоки оценить не удалось, но известно (по химическим и изотопным данным), что такие притоки существуют: во-первых, в верховьях р. Бодрак в химическом составе отмечены повышенные значения Mg²⁺ и SO₄²⁻; во-вторых, существует аномальная зона с притоками хлоридно-натриевых вод (северо-восточная часть д. Трудолюбовки); в-третьих, в областях распространения триасово-юрских отложений на глубинах более 20-

Расчет водного баланса бассейна р. Бодрак (данные в мм слоя)

атмосф. осадки		конденсация		подземный приток		суммарное испарение		поверхн. сток		подземн. сток		зарегулир. сток		потери на инф.
P	+	Z	+	T	=	E	+	h	+	W	+	s	+	i
692							40							
685	+	7	+	?	=	525		36	+	4	+	5	+	>122

Попробуем привлечь гидрохимические данные к оценке неизвестных составляющих баланса, для чего используем макрокомпонент Cl. В таблице 37 представлены данные по содержанию хлора в природных водах изучаемого района.

Содержания хлора в природных водах бассейна р. Бодрак (мг-экв./л)

атмосф. осадки		конденсация		подземный приток		суммарное испарение		поверхн. сток		подземн. сток		зарегулир. сток		потери на инф.
P	+	Z	+	T	=	E	+	h	+	W	+	s	+	i
0,06		0,06		24		0*		0,7		1,0		0,9		1,5

* принимаем, что испаряющаяся вода хлор-ион в заметных количествах не содержит

Примем допущение, что испарившаяся влага хлор-ион в заметных количествах не содержит. Содержания Cl в атмосферных осадках в среднем составляет – 0,06 мг-экв./л (глава 4.2), в подземном стоке – 1 мг-экв./л (среднее по многочисленным данным колодцев). В фильтрационных водах концентрации хлора приняты 1,5 мг-экв./л, такие содержания отмечены в водах палеогеновых отложений, которые прорезает р. Бодрак в районе Второй гряды (где, в основном, и теряются воды на инфлюацию). Далее рассчитаем баланс для хлора (синяя строчка в табл. 38), после чего вычислим подземные притоки в мм слоя:

$$175,2/24 = 7 \text{ (mm)}. \quad (48)$$

Расчет составляющих водного баланса бассейна р. Бодрак

	атмосферные осадки		конденсация		подземный приток		суммарное испарение		поверхн. сток		подземн. сток		зарегулир. сток		потери на инф.
	P	+	Z	+	T	=	E	+	h	+	W	+	s	+	i
	692							40							
	685	+	7	+	?	=	525		36	+	4	+	5	+	>122
Cl	41,5		+	175,2	=	0	+	25,2	+	4	+	4,5	+	>183	
Cl мг-экв	0,06			24		0*		0,7		1,0		0,9		1,5	
	699 мм					=	699 мм								

Безусловно, полученные цифры не претендуют на большую точность, но ориентировочные представления о составляющих водного баланса бассейна р. Бодрак дают (табл. 39).

Таблица 39

Водный баланс бассейна р. Бодрак (данные в мм слоя)

	атмосферные осадки		конденсация		подземный приток	=	суммарное испарение		поверхн. сток		подземн. сток		зарегулир. сток		инфильтр + невязка
	P		Z		T	=	E		h		W		s		i
<i>мм</i>	685	+	7	+	7	=	525	+	36	+	4	+	5	+	129
<i>% от осадков</i>	100		1		1		77		5		1		1		19

Интересно, что зарегулированная в ставках вода почти на 70% имеет подземное происхождение, это следует из содержаний хлора (табл. 38). Если принять количество воды в ставках бассейна р. Бодрак за 100%, то можно решая уравнение выяснить, какой процент подземный вод ($W_{\%}$) идет на заполнение водоемов:

$$1,0 \times W_{\%} + 0,7 \times (100\% - W_{\%}) = 0,9 \times 100\%; \quad (49)$$

$$W_{\%} = 67\%.$$

В процессе круговорота все природные воды бассейна р. Бодрак взаимодействуют. Поверхностный сток рек, имеющий сезонные колебания (паводок – межень), обеспечивает гидравлическую связь подземных вод с речными. Инфильтрационное питание подземных вод обуславливает функционирование подземного стока, формируя естественные ресурсы подземных вод. Анализ водного баланса водосборной площади р. Бодрак свидетельствует, что осадки расходуются, главным образом, на валовое увлажнение территории, величина которого составляет 652 мм (77% годовой суммы осадков). Подавляющая часть валового увлажнения расходуется на испарение.

Таблица 40

Элементы водного баланса бассейна р. Бодрак

осадки <i>мм</i>	общий речной сток	подземный		поверхностный		зарегулированный сток		испарение Е мм	валовое увлажнение территории <i>мм</i>	коэф. питания реки подземными водами
		<i>мм</i>	% общего	<i>мм</i>	% общего	<i>мм</i>	% общего			
692	45	4	9	36	80	5	11	525	652	0,01

Полный речной сток Бодрак формируется, главным образом, за счет поверхностной (паводковой) составляющей, доля которой 80%. Питание реки подземными водами происходит в основном за счет подрусловых, аллювиальных вод, а также подземных вод отложений: T_3-J_{1tv} , T_3-J_{1es} , J_2b , K_1 , P_2 . Коэффициент питания реки подземными водами 0,01.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 6

1. При изучении составляющих водного баланса бассейна р. Бодрак как представителя рек северо-западных склонов Крымских гор установлено, что сезонная нехватка естественных водных ресурсов для хозяйственно-питьевых нужд является следствием нерационального потребления и плохого хозяйствования.

2. Оценен конденсационный сток нижнемеловых отложений Второй гряды Крымских гор по данным летних меженных мониторинговых наблюдений за дебитами источников столовой горы Патиль.

3. Централизованный водозабор д. Трудолюбовка включает: воду подруслового потока р. Бодрак и родниковый сток. В меженный период основную нагрузку по количеству воды поступающей в водозабор несет на себе родник в левом борту р. Бодрак (Эмиров). Его минимальный дебит составляет от 130 до 150 м³/сут.

4. Выделены две группы рек северо-западных склонов Крымских гор для оценки подземного стока по объему зон дренирования в зависимости от абсолютных отметок продольных профилей речных русел: 1 гр. ($h_p < 400$ м) и 2 гр. ($h_p > 400$ м).

5. Подземный сток для рек и водотоков северо-западного склона на высотах более 400 м в 10 раз выше, чем на высотах менее 400 м. Это объясняется тем, что в 1 группу вошли реки и водотоки северо-западного склона (или участки среднего течения основных рек) почти лишенные карстового питания и пересыхающие в межень.

6. Оценена подземная составляющая речного стока Бодрак, составившая по разным методам около 4 мм слоя.

7. Искусственные водоемы бассейна р. Бодрак (по гидрохимическим данным) почти на 70% имеют подземное питание.

8. Рассчитан водный баланс бассейна р. Бодрак (данные представлены в мм слоя), невязка баланса включена в инфильтрацию:

$$P (685) + Z (7) + T (7) - E (525) + h (36) + W (4) + s (5) + i (129); \quad (50)$$

9. Полный речной сток Бодрак формируется, примерно на 80%, за счет поверхностной составляющей. Питание реки подземными водами происходит в основном за счет подруслых, аллювиальных вод и подземных вод отложений: T_3-J_{1tv} , T_3-J_{1es} , J_{2b} , K_1 , P_2 .

10. Поверхностный сток рек, имеющий сезонные колебания (паводок – межень), обеспечивает гидравлическую связь подземных вод с речными. Инфильтрационное питание подземных вод обуславливает функционирование подземного стока, формируя естественные ресурсы подземных вод бассейна р. Бодрак.

11. Анализ водного баланса водосборной площади р. Бодрак свидетельствует, что осадки расходуются, главным образом, на валовое увлажнение территории, величина которого составляет 652 мм (77% годовой суммы осадков). Подавляющая часть валового увлажнения расходуется на испарение.

12. За счет местных водных ресурсов (путем преобразования водного баланса территории) и грамотного хозяйствования можно значительно увеличить количество водных ресурсов для хозяйственно-питьевых нужд и повысить качество жизни населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена комплексным гидрогеологическим исследованиям, проводимым в предгорьях Крыма в летний период с 1998 г. по настоящее время, при этом бассейн р.Бодрак рассматривается как типичный представитель водосборных бассейнов группы рек северо-западных склонов Крымских гор. Выполненные на водосборе бассейна р.Бодрак исследования и расчеты отражают региональные особенности северо-западных склонов Крымских гор.

Меженный сток крайне чувствителен к воздействию антропогенных факторов и наблюдающимся в последние десятилетия климатическим изменениям [30]. Чтобы владеть реальной ситуацией с водными ресурсами на водосборной площади, иметь возможность оценивать перспективы развития водохозяйственного комплекса и тенденции возможных изменений водных ресурсов, а также планировать их рациональное использование важно представлять количественное выражение минимального стока и его соотношения с другими элементами водного баланса.

Необходимы колоссальные усилия и серьезные капиталовложения, чтобы вода в Крыму стала неисчерпаемым ресурсом, тем не менее это реально. Первый шаг к этому – работа с населением: необходимо внедрять современные методы рационального водопотребления (например, методы капельного орошения); перейти на обратное водоснабжение, уменьшив безвозвратные потери при орошении; для предотвращения количественного истощения водных ресурсов необходимо возобновить лесопосадки на водосборах и лесополосы в прирусловых частях рек; проводить мероприятия по сокращению поверхностного стока (например, распашкой, в результате которой улучшаются инфильтрационные свойства почвы и вода задерживается на полях) и т.д.

Особые усилия следует направить на реконструкцию существующих централизованных водозаборов и распределительных сетей; при этом необходимо установить контроль за эксплуатацией водных ресурсов; создать равные условия для доступа жителей к источнику центрального водоснабжения; организовать зону санитарной охраны; вести мониторинг режима и качества водных ресурсов. Важно также проводить разъяснительную работу среди населения о качестве подземных вод, используемых в питьевых целях.

В ходе написания данной диссертационной работы и проведенных исследований выявлены гидрогеохимические особенности природных вод территории и основные

различия инфильтрационных вод, циркулирующих в породах разного вещественного состава; выделены водоносные горизонты и зоны, сделана оценка элементов водного баланса бассейна р. Бодрак, в результате чего сделаны следующие основные выводы:

1. При изучении составляющих водного баланса бассейна р. Бодрак как аналога рек северо-западных склонов Крымских гор установлено, что сезонная нехватка естественных водных ресурсов для хозяйственных и питьевых нужд на данной территории является следствием нерационального потребления.

2. Практически все подземные воды в Предгорьях Крыма имеют инфильтрационный генезис. По природе растворителя основными «первоисточниками» воды во всех типах подземных вод являются метеорные.

3. Изучаемая территория отличается высокими скоростями водообмена неглубокозалегающих подземных вод. Гидрохимические и динамические особенности зоны активного водообмена определяются климатическими условиями и литологическими характеристиками водовмещающих отложений.

4. Грунтовые воды в большинстве своем пресные жесткие сульфатно-гидрокарбонатные или гидрокарбонатные магниевые-кальциевые (или смешанного катионного состава) щелочные. Выделено три гидрохимические генерации подземных вод области активного водообмена.

5. На глубинах более 20 – 30 м существуют притоки солоноватых вод из зоны замедленного водообмена, что отражается на химическом составе вод активного водообмена.

6. Выявлены естественные геохимические ассоциации в подземных водах района. Повышенные концентрации Ba, B, Ag, Sr, Sn является геохимической особенностью территории. Наиболее интенсивно в водах мигрируют N, Cl, S, B, Se.

7. Установлена степень равновесия подземных вод с карбонатными и сульфатными минералами. Все подземные воды исследуемой территории равновесны с кальцитом, неодинаковую степень насыщенности относительно доломита имеют подземные воды из различных вмещающих отложений; относительно сидерита подземные воды района обычно недонасыщены.

8. В летний период природные воды северо-западных склонов Крымских гор утяжеляются изотопами кислорода-18 и дейтерия.

9. Подземный сток рек северо-западных склонов Крымских гор со средней отметкой профиля речного русла 340 м над ур.м. формируется главным образом за счет зимне-весенних осадков; в летнюю межень подземный сток осуществляется за счет весенних осадков.

10. Все реки северо-западных склонов Крымских гор по абсолютной отметке продольного профиля речного русла делятся на две группы – 1 группа (менее 400 м) и 2 группа (более 400 м), каждая из которых имеет свою функциональную зависимость меженного стока от объемов зон дренирования $Q_{п} = f(V_{з.д.})$.

11. Оценен конденсационный сток нижнемеловых отложений Второй гряды Крымских гор по данным летних меженных мониторинговых наблюдений за дебитами источников столовой горы Патиль.

12. С привлечением гидрохимических данных построено уравнение среднемноголетнего водного баланса территории бассейна р. Бодрак.

13. Искусственные водоемы бассейна р. Бодрак почти на 70% имеют подземное питание.

14. Выявлен участок устойчивого нитратного загрязнения (2-4 ПДК) в зоне экзогенной трещиноватости вулканогенно-осадочной толщи (д. Трудолюбовка), здесь отмечены явления антропогенной метаморфизации подземных вод;

15. Вода централизованного водозабора д. Трудолюбовки соответствует нормам качества по обобщенным показателям и другим компонентам согласно СанПиН 1074-01 [160, 161]. Исключение составляют барий и железо, концентрации, которых в отдельные периоды могут превышать ПДК. Повышенное содержание бария в подземных водах - гидрохимическая особенность района;

16. В подземных водах северо-западной части д. Трудолюбовки на участке с притоками солоноватых хлоридно-натриевых вод из области замедленного водообмена выявлены повышенные ПДК (относительно СанПиН 1074-01) ряда микрокомпонентов: Al, B, Mn, Fe.

17. Повышенные концентрации ряда металлов (Cd, Mn, Pb) в химическом составе пресных подземных вод района представлены высокотоксичными гидратированными (свободными) ионами и карбонатными комплексами. Барий примерно на 90% мигрирует в виде катионов Ba^{2+} , которые являются токсичным веществом; миграционные формы Al и Fe не токсичны; нитрат-анион высокотоксичен; бор представлен токсичной кислотой H_3BO_3 .

18. За счет местных водных ресурсов (путем преобразования водного баланса территории) и грамотного хозяйствования можно значительно увеличить количество водных ресурсов для хозяйственно-питьевых нужд и повысить качество жизни населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Автономная республика Крым. Атлас / под ред. Н.В. Багрова, Л.Г. Руденко. Киев – Симферополь: Изд-во Института географии НАН Украины, 2003. – 80 с.
- 2 *Акименко М.И., Корнилов Э.Б., Москаленко С.В., Парфенов А.В., Яшина В.И.* Минеральный состав элювия патильской и мангушской свит (Крым) / Доклады X Межд. конф. «Новые идеи в науках о Земле», Москва, РГГУ, 12—15 апреля, 2011 г.Т.1. / РГГРУ. – М.: Экстра-Принт, 2011. – С. 172.
- 3 *Алексеев Л.С.* Контроль качества воды: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 154 с.
- 4 *Альбов С.В.* Гидрогеология Крыма. – Киев: Изд-во АН УССР, 1956. – 321 с.
- 5 *Альбов С.В.* Пресные воды Крыма и их использование / Киев: Изд-во АН УССР, 1955. – 31 с.
- 6 *Аркадьев В.В.* Геологические экскурсии по Крыму. - СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2010. – 132 с.
- 7 *Бабиченко В.Н.* Пятое национальное сообщение Украины по вопросам изменения Климата. Подразделение 2.4. Климат Украины. Киев, 2009. – 367 с.
- 8 *Барабошкина Т.А., Березкин В.Ю.* Эколого-геологическое картографирование бассейна р. Бодрак (Крымско-Кавказская горная зона). Academic Publishing, Германия, 2011. – 152 с.
- 9 *Будыко М.И.* Испарение в естественных условиях. Л.: Гидрометеиздат, 1948. – 136 с.
- 10 *Букаты М.Б.* Численные методы моделирования геомиграции радионуклидов. Учебное пособие. - Томск: изд. ТПУ, 2008. – 89 с.
- 11 *Ваганов П.А., Куриленко В.В., Хайкович И.М.* Математические методы в экологической геологии / Под ред. В.В. Куриленко и И.М. Хайковича. Учебное пособие. Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2008. 302 с.
- 12 *Вахрушев Б.А.* Конденсаційна складова підземного живлення річок і джерел Кримсько-Кавказького карстового регіону // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – К.: Ніка-Центр, 2001. - Т.2. – С. 283-289.
- 13 *Вахрушев Б.А.* Палеогеография Крыма в свете новейших карстолого-спелеологических исследований // Культура народов Причерноморья. – Симферополь: Межвузовский центр «Крым», 2001. - № 17. – С. 11-18.
- 14 *Виноград Н. А., Каюкова Е. П., Павлов А. Н., Реш В., Сумина Н. И.* Методы комплексной оценки качества подземных и поверхностных вод. Учебное пособие. – СПб.: ВВМ, 2007. – 136 с.
- 15 Водные ресурсы и баланс вод Украины и Молдавии / под ред. Л.И. Онуфриенко, В.И. Мокляка. - Труды УкрНИГМИ, вып. 64. - Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 208 с.
- 16 Водный баланс СССР и его преобразование. Ред М.И. Львович, М.: Наука, 1969. – 337 с.

- 17 *Гавич И.К., Лучшева А.А., Семенова-Ерофеева С.М.* Сборник задач по общей гидрогеологии. Учебное пособие. – 2-е изд. – М.: Недра. 1985. – 412 с.
- 18 *Газизова Э.А., Кулькова М. А., Каюкова Е.П.* Распределение трития в поверхностных и подземных водных объектах Крыма // Геология, геоэкология, эволюционная география. Сб. науч. трудов / под ред. Е. М. Нестерова. – СПб.: Изд-во Рос. гос. пед. ун-та им А. И. Герцена, 2010. – С. 132-136.
- 19 *Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л.* Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968. – 368 с.
- 20 Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода. Том 1. Система вода-порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование // под ред. С.Л. Шварцева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005 - 244 с.
- 21 Геологическое строение Качинского поднятия горного Крыма. Стратиграфия мезозоя / под ред. О.А. Мазаровича, В.С. Милеева. - М.: Изд-во МГУ, 1989. – 168 с.
- 22 Геология СССР. Т. 8. Крым / под ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1969. – 578 с.
- 23 Геохимия окружающей среды / *Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др.* - М.: Недра, 1990. - 335 с.
- 24 Гидрогеология Крыма и перспективы его нефтегазоносности / под ред. В.Г. Ткачук: Изд-во АН Укр. ССР, Киев, 1963. – 138 с.
- 25 Гидрогеология СССР. Т. 8. Крым / под ред. В.Г. Ткачук: М., Недра. 1970. – 351 с.
- 26 *Гопченко С. Д., Лобода Н. С.* Оцінювання природних водних ресурсів України за методом водно-теплогового балансу // Укр. НДГМІ. 2001, вып. 249. – С. 106-120.
- 27 Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т.6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым. // Под ред. М.И. Цукановой. Л.: Гидрометеиздат, 1980. – С. 120.
- 28 *Давыдова О.А., Климов Е.С., Ваганов Е.С.* Влияние физико-химических факторов на содержание тяжелых металлов в водных экосистемах. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – 167 с.
- 29 *Догановский А.М., Малинин В.Н.* Гидросфера Земли. СПб: Гидрометеиздат, 2004. 630 с.
- 30 Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2014 году: <http://meco.rk.gov.ru/rus/index.htm/news/309951.htm>. Дата обращения 10.12 2015.
- 31 *Драган Н.А.* Почвенные ресурсы Крыма: Научная монография. Симферополь: Доля, 2004. – 208 с.
- 32 *Дробноход Н.И.* Оценка запасов подземных вод. Киев, 1976. – 216 с.
- 33 *Дубинчук В.Т., Поляков В.А., Корниенко Н.Д.* Ядерно-геофизические методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1988. – 223 с.
- 34 *Дублянский В.Н.* Режим влажности почвогрунта Ай-Петринского горного массива и его гидрогеологическое значение // Почвоведение. 1967. Вып. 12. – С. 91–97.

- 35 *Дублянський В.Н., Шутів Ю.І., Амелічев Г.Н.* Оценка химической денудации карстовых массивов Горного Крыма // Геологический журнал № 4, 1990. – С. 37-39.
- 36 *Дублянський Ю.В., Климчук А.Б., Амелічев Г.Н., Токарев С.В., Шнётль К.* Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор // Спелеология и карстология, - № 9. – Симферополь. – 2012. – С. 14-21.
- 37 *Дячук В.А., Баітаннік М.П., Харченко Г.П.* Третій в атмосферних опадах в Україні. Укр.гідрометеорологічний інститут, Київ.
http://www.uhmi.org.ua/pub/np/253/5_Djachyk_Bascht_Char.pdf - дата обращения 10.07.2011.
- 38 *Ена В.Г., Ена Ал.В., Ена Ан.В.* Открыватели земли Крымской. Симферополь: Бизнес-Информ, 2007. – 520 с.
- 39 *Зайков Б.Д.* Средний многолетний сток и его распределение в году на территории СССР. Труды НИУ ГМС, сер. IV, вып.24. Гидрометеиздат, 1946. – 148 с.
- 40 *Зверев А.Т.* Разработка теории экосистемного подхода для решения фундаментальных проблем экологического картографирования при комплексной оценке экологических обстановок / А. Т. Зверев // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2007. - №3. – С. 124-126.
- 41 *Зверев В. П.* Вода в земле. М.: Научный мир, 2009. – 251 с.
- 42 *Зекцер И.С.* Закономерности формирования подземного стока и научно-методические основы его изучения. – М.: Наука, 1977. – 173 с.
- 43 *Зеленой А.И.* О морфометрическом способе изучения и картирования подземного стока в реки Нижнего Приамурья. Труды гос-го гидрологического института, вып. 166. Исследование подземного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1969. – С. 161-169.
- 44 *Зеленой А.И.* Об оценке подземного стока горного Мяо-Чана и смежных с ним районов Нижнего Приамурья. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, Изд-во МГРИ, Москва, 1969, № 3. – С.124-129.
- 45 Изменение климата, 2007. Обобщающий доклад Межправительственной группы экспертов. МГЭИК, Женева, Швейцария, 104 с.
http://www.ipcc.ch/home_languages_main_russian.htm. (дата обращения 01.09.2010).
- 46 Изотопный состав атмосферных осадков в Центральной и Восточной Европе. Материалы метеорологических исследований, № 12. Межведомств. геофизический комитет АН СССР. М., 1987. – С. 88.
- 47 *Караулов В. Б.* Изучение четвертичных отложений и геоморфологии на учебной геологической практике в Крыму. Москва, 1991. – 50 с.
- 48 *Каюкова Е.П.* Влияние атмосферных осадков на формирование поверхностных и подземных вод полигона Крымской геологической практики // Междунар. симпозиум «Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы»: Тез. докл. - СПб.: С.-Петербург. ун-т. 2007. – С. 62-65.

- 49 *Каюкова Е.П.* Водоносность меловых отложений восточной части Бахчисарайского района Крыма // Материалы второго всеросс. совещания. Меловая система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. СПб.: Изд-во НИИЗК СПбГУ. - 2004. – С. 38.
- 50 *Каюкова Е.П.* Геохимические особенности природных вод бассейна реки Бодрак 67(северо-западные склоны Крымских гор) // Геохимия ландшафтов (к 100-летию А.И. Перельмана). Доклады Всероссийской научной конференции. Москва, 18-20 октября 2016 г., М.: Географический факультет МГУ, 2016. – С. 255 – 259.
- 51 *Каюкова Е.П.* Гидрогеологические условия бассейна р.Бодрак (Юго-Западный Крым) // В сб. Геология Крыма. Ученые записки кафедры ист. геологии. Вып.2 / Ред. В.В. Аркадьев. СПб.: НИИЗК СПбГУ. - 2002. – С. 147-154.
- 52 *Каюкова Е.П.* Гидрохимические особенности атмосферных осадков полигона Крымской геологической практики СПбГУ // Вестник С.-Петербур. ун-та. - Сер. 7: Геология, география. - 2011. - Вып. 2. – С. 26-43.
- 53 *Каюкова Е.П.* Изучение и оценка подземного стока малых рек на примере бассейна р. Бодрак (Юго-Западный Крым) // Вестн. С.-Петербур. ун-та. - Сер. 7. - 2015. - Вып. 2. С.130-151.
- 54 *Каюкова Е.П.* Использование гидрохимических данных для оценки элементов водного баланса (на примере бассейна р.Бодрак, юго-западный Крым) // Вестн. С.-Петербур. ун-та. - Сер. 7: Геология, география. – 2016. - Вып. 4. - С. 25-36.
- 55 *Каюкова Е.П.* Использование изотопных методов для оценки элементов водного баланса // Вестник С.-Петербур. ун-та. - Сер. 7: Геология, география. - 2013. - Вып. 4. – С. 53-61.
- 56 *Каюкова Е.П.* Мезоклимат полигона Крымской геологической практики и современные тенденции его изменения // Вестник С.-Петербур. ун-та. - Сер. 7: Геология, география. - 2010. - Вып. 4. – С.32-46.
- 57 *Каюкова Е.П.* Методика описания водопунктов. Правила отбора и консервации водных проб: - учеб. пособие. - СПб.: Изд-во НИИЗК СПбГУ. - 2004. – 16 с.
- 58 *Каюкова Е.П.* Оценка подземного стока морфометрическим методом (юго-западный Крым). Коллективная монография «Геология, геоэкология, эволюционная география». Том XIII / Под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Снытко – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена. – 2014. - С. 85-89.
- 59 *Каюкова Е.П.* Роль атмосферных осадков в формировании поверхностных и подземных вод восточной части Бахчисарайского района Крыма // Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы (коллективная монография). СПб.: СПбГУ, 2008. – С. 151-156.
- 60 *Каюкова Е.П.* Роль Крымской гидрогеологической практики в обучении студентов геологов и гидрогеологов // III международная конференция «Полевые практики в системе высшего профессионального образования»: Тез. докл. - Новосибирск, 2009. – С. 179-180.

- 61 *Каюкова Е.П.* Формирование химического состава и качество питьевых вод Восточной части Бахчисарайского района Крыма. // Материалы междунар. науч.-практич. конференции «Питьевые подземные воды. Изучение, использование и информационные технологии» (18-22 апреля 2011 г.). - Моск. обл., п. Зеленый. Ч. 2. – С. 304-316.
- 62 *Каюкова Е.П.* Экологические проблемы питьевого водоснабжения восточной части Бахчисарайского района Крыма // Сб. докл. 3-й Междунар. конференции «Геологические проблемы современности». - Владимир, 2010. – С. 106-110.
- 63 *Каюкова Е.П.* Экологическое состояние основных водоносных горизонтов Второй гряды Крымских гор // Межвуз. сб. науч. трудов «Гидрогеология и карстоведение». Отв. ред. А.Я. Гаев. Пермь. - 2013. - Вып. 19. - С.99-106.
- 64 *Каюкова Е.П.* Эколого-гидрогеологическая характеристика бассейна реки Бодрак (Юго-западный Крым) // Ежегодн. гидрол. сборник, СПб.: РГГМУ. - 2004.
- 65 *Каюкова Е.П., Барабошкина Т.А., Косинова И.И.* Ресурсный потенциал пресных вод Крыма. Статья 1. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. - 2014. - № 4. – С. 101-106.
- 66 *Каюкова Е.П., Котова И.К.* Экологическая оценка химического состава дождевых осадков в пределах Внутренней гряды Крымских гор // Вестник С.-Петербур. ун-та. - Сер. 7: Геология, география. 2012. - Вып. 1. – С.39-49.
- 67 *Каюкова Е.П.* Химический и изотопный состав природных вод бассейна реки Бодрак (Юго-Западный Крым / Материалы V Всероссийской конференции «Полевые практики в системе высшего образования» / Под ред. В.В. Аркадьева. — СПб.: ВВМ. 2017. - С. 153-156.
- 68 *Каюкова Е.П.* Формирование изотопного состава природных вод Горного Крыма под влиянием естественных процессов // Вестн. С.-Петербур. ун-та. - Сер. 7: Геология, география. – 2016. - Вып. 2. - С. 11-26.
- 69 *Каюкова Е.П., Чарыкова М.В.* Особенности химического состава подземных и поверхностных вод полигона Крымской учебной практики геологического факультета СПбГУ // Вестник С.-Петербур. ун-та. - Сер. 7: Геология, география. - 2010. - Вып. 3. – С. 29–47.
- 70 *Каюкова Е.П., Юровский Ю.Г.* Водные ресурсы Крыма // Геоэкология. 2016, № 1. – С. 25-32.
- 71 *Кирюхин В.А., Коротков А.И., Павлов А.Н.* Общая гидрогеология: Учебник для вузов. - Л.: Недра, 1988. – 359 с.
- 72 *Кирюхин В.А., Коротков А.И., Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия: Учебник для вузов. – М., «Недра», 1993г. – 384 с.
- 73 *Кирюхин В.А., Никитина Н.Б., Судариков С.М.* Гидрогеохимия складчатых областей. – Л.: Недра, 1989. – 253 с.
- 74 *Кирюхин В.А., Толстихин Н.И.* Региональная гидрогеология: Учебник для вузов – М.: Недра, 1987 – 382 с
- 75 Климат Украины / под ред. Г. Ф. Приходько, А. В. Ткаченко, В. Н. Бабиченко. Л.:

Гидрометеиздат, 1967. – 414 с.

- 76 *Климчук А.Б., Амеличев Г.И., Тимохина Е.И.* Гипогенный спелеогенез западной части Предгорного Крыма и его значение для понимания карстообразования в Равнинном Крыму. Тезисы «Крымские карстовые чтения: Состояние и проблемы карстолого-спелеологических исследований». Симферополь, 2008. – С.15- 17.
- 77 *Климчук А.Б., Амеличев Г.И., Токарев С.В., Тимохина Е.И.* Эволюционно-генетические аспекты карста и пещер провинции Горного Крыма (Крымско-Кавказская карстовая страна) / V Региональная научно-практическая конференция «Карст и пещеры Кавказа: результаты, проблемы и перспективы исследований» (Сочи, 1-4 ноября 2014 г.). <http://cml.happy.kiev.ua/cgi-bin/cml.cgi?num=15160>. Дата обращения 07.11.2016
- 78 *Климчук А.Б., Тимохина Е.И., Амеличев Г.И. и др.* Гипогенный карст предгорного Крыма и его геоморфологическая роль. – Симферополь: ДИАЙПИ. – 2013. – 204 с.
- 79 *Константинов А.Р.* Испарение в природе. Л., Гидрометеиздат, 1968. – 532 с.
- 80 *Коротков А. И., Павлов А, Н.* Гидрохимический метод в геологии и гидрогеологии. Изд-во: Недра, Ленинград, 1972. – 184 с.
- 81 *Коротков А.И.* Гидрогеологические условия района Куйбышево - Голубинка: Методическое пособие к учебной геологической практике в Крыму. Л.: ЛГИ. 1973. – 35 с.
- 82 *Коротков А.И.* Гидрогеологические экскурсии в район главной гряды Крымских гор: Методические указания к учебной геологической практике в Крыму. СПб., 1995. – 19 с.
- 83 *Корытный Л.М.* Бассейновый подход в географии / Л.М. Корытный // География и природные ресурсы. 1991.-№ 1. – С. 161-166.
- 84 *Котова И.К., Булдаков И.В.* Факторный анализ при исследовании геологических систем: Элементарные основы факторного анализа. Принципы интерпретации его результатов: учебно-метод. пособие. – 2-е изд. СПб.: С.Петербург. ун-т, 2009. – 48 с.
- 85 *Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.* Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
- 86 *Куделин Б. И.* Гидрогеологический анализ и методы определения подземного питания рек. Тр. Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР, 1949), т. 5. – 179 с.
- 87 *Куделин Б.И.* Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод, М., 1960. – С. 342.
- 88 *Кузин П.С.* График испарения с поверхности речного бассейна и его применение к расчету среднего многолетнего стока. – Записки ГГИ, 1934, Т. 12. – С. 189-209.
- 89 *Линник П.Н.* Содержание лабильной фракции металлов в поверхностных водах как важный элемент при оценке их потенциальной токсичности. Гидробиологический журнал, том 46, 2010, № 6. – С. 90-104.
- 90 *Линник П.Н., Васильчук Т.А. и др.* Сосуществующие формы тяжелых металлов в

- поверхностных водах Украины и роль органических веществ в их миграции. Методы и объекты химического анализа, 2007, т. 2, № 2. – С. 130–145.
- 91 *Линник П.Н., Набиванец Б.И.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. - Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 269 с.
 - 92 *Лобода Н.С.* Методические подходы к оценке естественных водных ресурсов горных районов на основе метеорологической информации // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія та гідрологія. - Одеса. - 2002. Вип. 45. – С. 118-124.
 - 93 *Львович М.И.* Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. - 448 с.
 - 94 *Макаренко Ф.А.* О подземном питании рек // Труды лаборатории гидрогеол. проблем АН СССР, Т. 1. - 1948, – С. 67-71.
 - 95 *Матвеев А.А., Башмакова О.И.* Химический состав атмосферных осадков некоторых районов СССР. – Гидрохимические материалы, 1966, т.42. – С. 3-17.
 - 96 *Мезенцев В.С.* Расчет водного баланса. Омск, сельхоз. ин-т. 1976. – 76 с.
 - 97 Минеральные ресурсы Крыма и прилегающей акватории Черного и Азовского морей. Атлас: приложение к сб. «Вопросы развития Крыма» / А.Я. Хмара и др. Симферополь: Таврия-Плюс, 2001. - 80 с.
 - 98 *Моисеев А. С.* О возрасте песчаников и конгломератов дер. Битак близ Симферополя // Бюл. МОИП. Отд. геол. – М., 1939. – Т. 2. – № 1–2. – С. 26–28.
 - 99 *Муратов М.В.* Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова. М., 1960. – С. 180.
 - 100 *Муратов М.В.* Основы стратиграфии четвертичных отложений Горного Крыма / В кн.: Материалы совещания по изучению четвертичного периода. М., 1961. Т. II. – С. 351-357.
 - 101 *Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Бразникова Л.В., Жулидов А.В.* Качество вод. Мониторинг качества вод: оценка токсичности. Вып.3. – С.-Пб: Гидрометеиздат, 2000. – 158 с.
 - 102 *Никаноров А.М.* Гидрохимия. С.-Пб.: Гидрометеиздат, 2001. – 444 с.
 - 103 *Никаноров А.М., Федоров А.М.* Стабильные изотопы в гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 247 с.
 - 104 *Никитин М. Ю., Болотов С. Н.* Геологическое строение Крымского учебного полигона МГУ. Ч. 1. Учебное пособие – М.: Изд-во МГУ, 2006. – 135 с
 - 105 *Никитин М. Ю., Болотов С. Н.* Геологическое строение Крымского учебного полигона МГУ. Ч. 2. Учебное пособие – М.: Изд-во МГУ, 2007. – 110 с.
 - 106 *Никитин М. Ю., Седаева К. М., Майорова Т.П.* Путеводитель по первой крымской учебно-геологической практике. Сыктывкар, 2006. – 125 с.
 - 107 *Никишин А.М. и др.* Геологическая история Бахчисарайского района Крыма. Учебное пособие по Крымской практике. М.: Изд-во МГУ, 2006. – 60 с.
 - 108 *Овчинников А.М.* Общая гидрогеология. М., 1955. – 390 с.

- 109 *Овчинников Л.Н.* Прикладная геохимия. – М.: Недра, 1990.- 248 с.
- 110 *Олиферов А.Н., Тимченко З.В.* Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. – 216 с.
- 111 *Ольдекоп Э.М.* Об испарении с поверхности речных бассейнов. Юрьев, 1911. – 209 с.
- 112 Оценка запасов подземных вод. Б.В. Боровский, Н.И. Дробноход, Л.С. Язвин. Киев, 1989. – 407 с.
- 113 Очерки геологии Крыма. / Труды Крымского геологического научно-учебного центра им. проф. А.А. Богданова. Вып. 1. М.: Изд-во геол. ф-та МГУ, 1997. – 265 с.
- 114 *Панов Д.И., Болотов С.Н., Косоруков В.Л. и др.* Стратиграфия и структура таврической серии (верхний триас-лейас) Качинского поднятия юго-западного Крыма // Бюллетень МОИП. Отд. геол. 2009. Т. 84. Вып. 5. – С. 52-73.
- 115 *Перельман А.И.* Геохимия / Учебник для вузов. М.: Высш. школа. 1989. – 528 с.
- 116 *Подгородецкий П.Д.* Крым: Природа. Справочное издание. Симферополь: Таврия. 1988. – 192 с.
- 117 Подземный сток на территории СССР / Под ред. Куделина Б.И. М.: Изд-во МГУ, 1966. – 301 с.
- 118 *Посохов Е.В.* Общая гидрогеохимия. Л., Недра, 1975. – 208 с.
- 119 *Ранкама К.* Изотопы в геологии. М.: ИЛ, 1956, – 456 с.
- 120 Республиканский комитет водного хозяйства РК (Рескомводхоз РК). Официальный сайт: <http://www.vodhoz.crimea.ua/>. Дата обращения 20.09.2010.
- 121 Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрогеологические характеристики. Т. 6. Украина и Молдавия / Под ред. М.М. Айзенберга, М.С. Каганера. Вып. 4. Крым. Л., Гидрометеиздат, 1966. – 344 с.
- 122 Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 3. Крым и Приазовье/ Под ред. Б. М. Штейнгольца. — Л.: Гидрометеиздат, 1964. — 128 с.
- 123 Сайт «Погода России»: <http://meteo.infospace.ru/>. Дата обращения 3.12.2010.
- 124 Сайт компании ООО «Расписание Погоды»: <http://rp5.ru>. Дата обращения 3.12.2010.
- 125 Справочник по климату СССР. Сер. 3, вып. 10, кн. I. // Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 604 с.
- 126 Справочник руководство гидрогеолога, том 1. под ред. В.М.Максимова. Л., Недра. 1979. – 512 с.
- 127 Трансформация структуры водного баланса в Крыму в XX веке – начале XXI века и ее оптимизация / под ред В.А. Бокова. – Симферополь: Крымский научный центр, 2011. – 227 с.

- 128 Устойчивый Крым. Водные ресурсы / Гл.ред. В.С. Тарасенко. Симферополь, «Таврида», 2003. – 413 с.
- 129 Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. М.: Наука, 1983. – 272 с.
- 130 Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопы гидросферы земли. М., 2009. – 632 с.
- 131 Ферронский В.И., Поляков В.А., Романов В.В. Космогенные изотопы гидросферы. М., 1984. – 268 с.
- 132 Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. – 590 с.
- 133 Цейслер В.М., Караулов В.Б., Портная Е.Л., Христофорова Н.Ф. Учебная геологическая практика в Крыму: Учебное пособие. М., Изд-во МГРИ. – 95 с.
- 134 Цейслер В.М., Караулов В.Б., Туров А.В., Комаров В.Н. О местных стратиграфических подразделениях в восточной части Бахчисарайского района Крыма // Известия вузов. Геология и разведка. 1999. № 6. – С. 8-18.
- 135 Чеботарев А.И. Общая гидрология. Л., Гидрометеиздат, 1975. – 544 с.
- 136 Чертко Н.К., Чертко Э.Н. Геохимия и экология химических элементов: Справочное пособие / Минск: Издательский центр БГУ, 2008. – 140 с.
- 137 Шварцев С.Л. Внутренняя эволюция геологической системы вода - порода / Вестник РАН, 2012. т. 82, № 3. – С. 242-251.
- 138 Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М. 1998. – 288 с.
- 139 Шварцев С.Л. Общая гидрогеология: Учебник для вузов – М.: Недра, 1996. – 423 с.
- 140 Шварцев С.Л., Савичев О.Г., Вертман Г.Г. и др. Эколого-геохимическое состояние речных вод Средней Оби // Водные ресурсы. 1996. Т. 23, № 6. – С. 723–731.
- 141 Шумигина А.Ю., Цытин М.А., Каюкова Е.П., Чарыкова М.В., Волин К.А. Эколого-гидрохимический мониторинг природных вод Крымского учебного полигона // Школа экологической геологии и рационального недропользования. Мат-лы конференции, СПб. 2006. - С.300 –301.
- 142 Юдин В.В. Геодинамика Крыма. Симферополь: ДИАЙПИ, 2011. – 336 с.
- 143 Юдин В.В. Геологическое строение Крыма на основе актуалистической геодинамики. Симферополь, 2001. – 46 с.
- 144 Юдин В.В. Геология Крыма на основе геодинамики (научно-методическое пособие для учебной геологической практики). Сыктывкар, 2000. – 43 с.
- 145 Юдин В.В. Геология Симферополя в геодинамике Крыма. Сб. науч. трудов «От минералогии до геохимии», посвященный 130-летию со дня рождения академика А. Е. Ферсмана – Киев, 2013. С. 207-217. (М-лы Междунар. науч. конф. 5-7 июня 2013 в с. Береговое, АРК) <http://museumkiev.org/Geology/conf/fersman.pdf>
- 146 Юдин В.В. Симферопольский меланж / Докл. РАН, 1993. Т.333. №2. – С. 250-252.
- 147 Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). М.: ИМГРЭ, 2002. – 52 с.

- 148 *Craig, H.* Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, v. 133, No 3464, pp. 1702-1703.
- 149 *Gat J.R.* The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation. In: P. Fritz and J.-Ch. Fontes (Eds), *Handbook of environmental isotope geochemistry*, 1980. vol. 1, The Terrestrial Environment. A. Elsevier, Amsterdam, pp. 21–48.
- 150 [Global Network Isotopes in Precipitation \(GNIP\)](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html) - Сайт Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ): http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html. Дата обращения 10.07.2011.
- 151 *Kayukova E.* Nitrate contamination of waters of the site within the southwestern Crimea // Workshops «Nitrate in Ground waters in Europe». 2002. Poland.
- 152 *Lucas L.L., Unterweger M.P.* Comprehensive review and critical evaluation of half-life of tritium. *Journal of Research of National Institute of Standards and Technology*. 2000. 105(4):541.
- 153 *Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J.*, 1999. User's guide to PHREEQC (version 2). US Geol. Surv. Water Resour. Inv. Rep. 99-4259, 312 p.
- 154 *Rudnick R. L. and Gao S.* (2003) Composition of the continental crust. In *The Crust*, vol. 3 (ed. R. L. Rudnick). Elsevier, pp. 1-64.
- 155 *Schreiber, P.* 1904: Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. *Meteorolog. Z.* 21, 441 – 452.
- 156 *Stable Isotope Hydrology. Deuterium and oxygen-18 in water ccle.* IAEA TRS-210. — Vienna: IAEA, 1981.
- 157 *Turc L.* Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour/ *Ann. Agron*, 1961, № 12, p. 13 – 49.
- 158 *Turc, L.* 1954: Le bilan d'eau des sols. Relation entre la précipitation, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agron.* 5, 491 – 569.
- 159 ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования».
- 160 МУ 2.1.4.682-97. Методические указания по внедрению и применению Санитарных правил и норм СанПиН 2.1.4.559-96 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества».
- 161 СанПиН 2.1.4.1074-01. Санитарные правила и нормативы «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества».

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1

Среднемесячные температуры по данным метеостанции пос. Почтовый, °С

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	сред- ние
январь	2,1	3,1	-1,4	2,6	-0,5	2,0	2,5	3,8	5,1	5,0	-1,0	1,9	2,1	1,0	2,0
февраль	1,4	3,6	2,3	2,5	5,8	-2,1	1,5	2,3	1,3	2,3	1,3	4,3	4,8	0,3	2,3
март	3,7	6,9	4,2	8,0	7,3	1,3	6,1	2,4	6,5	6,3	8,3	5,2	5,1	4,3	5,4
апрель	13,3	11,8	13,3	10,6	8,9	8,0	10,6	10,4	10,2	8,3	12,1	9,6	10,2	9,1	10,5
май	15,6	12,9	15,1	13,6	15,3	17,7	14,4	16,3	14,9	17,2	14,3	14,9	16,5	15,1	15,3
июнь	20,1	20,8	18,5	18,7	20,0	18,9	18,2	18,2	20,0	21,8	19,7	21,8	22,1	20,0	19,9
июль	22,5	23,8	22,9	25,4	24,8	20,6	21,0	22,2	20,6	24,2	22,2	23,1	24,2	23,8	23,0
август	21,7	21,6	22,3	23,5	20,6	21,4	20,9	23,2	23,4	24,7	23,3	20,6	25,1	21,7	22,4
сентябрь	17,3	17,4	16,0	17,5	17,6	15,9	17,0	18,8	16,6	17,7	17,0	17,7	18,6	17,7	17,3
октябрь	12,4	10,7	10,6	10,7	11,9	11,8	11,6	10,8	12,5	13,2	12,5	14,7	9,1	10,5	11,6
ноябрь	5,7	5,0	9,7	6,8	8,8	6,7	7,3	7,5	6,5	5,2	7,7	8,3	12,6	2,5	7,2
декабрь	0,9	6,0	5,0	-0,9	-2,4	3,3	3,7	4,4	2,9	2,9	3,8	5,8	6,4	5,7	3,4
годовые	11,4	12,0	11,5	11,6	11,5	10,5	11,2	11,7	11,7	12,4	11,8	12,3	13,07	10,98	11,7

Примечание: выделены данные, превышающие средние среднегодовые значения за период 1998-2011 гг.

Среднегодовые за период 1998 - 2008 гг.	11,6°С
Среднегодовые за период 1998 - 2011 гг.	11,7°С
Годовая норма температуры воздуха (1930 – 1980 гг.)	10,7°С

Приложение 2

Среднемесячные осадки по данным метеостанции пос. Почтовый, мм

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	сред- ние
январь	55,1	14,4	82,6	30,4	24,6	48,2	65,7	49,2	18,6	98,7	19,1	52,1	46,6	30,8	45,4
февраль	63,5	71,0	48,7	60,5	17,9	26,3	73,8	19,7	23,6	27,3	23,7	24,7	50,2	10,3	38,7
март	62,8	29,9	50,6	35,5	24,9	30,1	8,7	43,9	44,5	42,7	63,6	37,9	70,3	10,7	39,7
апрель	7,2	6,7	18,3	46,8	52,4	35,7	14,7	44,1	17,3	26,0	30,5	0,4	8,8	58,6	26,3
май	53,3	78,5	7,3	47,5	5,5	2,2	84,5	29,7	29,0	5,4	61,4	82,1	13,1	43,6	38,8
июнь	195,1	83,2	75,7	77,0	47,6	26,9	30,9	144,2	87,7	19,3	41,8	34,1	81,9	98,2	74,5
июль	59,2	65,0	1,3	5,9	198,0	97,7	28,7	43,3	130,4	0,9	34,3	48,8	37,1	21,8	55,2
август	4,2	58,9	15,0	30,5	197,8	70,3	164,6	13,7	16,8	14	9,2	23,1	19,1	33,3	50,1
сентябрь	11,4	18,5	44,1	72,4	83,1	17,3	21,7	31,8	34,6	74,7	68,3	9,7	21,5	22,2	39,2
октябрь	44,7	80,9	14,0	28,6	127,5	50,8	14,4	92,6	53,6	22,4	36,2	13,5	54,1	48,0	48,2
ноябрь	39,2	104,7	4,1	59,7	36,2	42,2	80,1	41,8	106,4	113,4	27,3	39,8	36,0	2,1	53,6
декабрь	58,0	77,8	34,8	32,3	10,2	10,3	24,9	89,6	17,0	34	22,9	55,4	75,0	44,3	38,9
годовые	653,7	689,5	396,5	527,1	825,7	458	612,7	643,6	579,5	478,8	438,3	421,6	308,0	423,9	532,8

Примечание: выделены данные, превышающие средние среднегодовые значения за период 1998-2011 гг.

Среднегодовые осадки за период 1998 - 2008 гг.	573 мм
Среднегодовые осадки за период 1998 - 2011 гг.	533 мм
Годовая норма атмосферных осадков (1930 – 1980 гг.)	523 мм

Содержание микрокомпонентов в ставках (прудах) бассейна р. Бодрак, мг/л

Код точки	501	502	503	504	505	515	506	507	509	512
Место отбора	Воронежский	Ексиментий	Колхозный	Ленинградский	Мангуш (Изенчук)	Юркин	Мендер (дальний)	Мендер (средний)	Мраморный	Широкий Яр
Ag	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,015	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,0044	<0,0001–0,084	<0,0001	<0,0001–0,00021
Al	0,11–0,15	0,15–0,19	0,17–0,95	0,023–0,23	0,16–0,35	0,31–1,1	0,014–1,0	0,16–0,21	0,14–0,35	0,16–0,28
As	<0,0001–0,0007	<0,0001–0,0019	<0,0001–0,0048	<0,0001–0,0006	<0,0001–0,0008	<0,0001	<0,0001–0,0004	<0,0001–0,0004	<0,0001–0,0025	<0,0001–0,0014
B	0,061–0,065	0,096–0,100	0,13–0,17	0,028–0,070	0,13–0,14	0,11–1,0	0,043–0,084	0,063–0,064	0,056–0,086	0,092–1,2
Ba	<0,0001–0,33	0,017–0,37	0,039–0,43	0,13–0,45	0,33–0,42	0,085–1,6	0,2–0,59	0,30–0,65	0,062–0,71	0,0096–0,013
Cd	<0,0001–0,00016	<0,0001	0,000022	0,00005	0,000013	<0,0001–0,00031	<0,0001–0,0002	0,000036	0,000026–0,00042	0,00009
Co	0,0001–0,0011	<0,0001–0,0002	<0,0001–0,0011	<0,0001–0,0002	<0,0001–0,0002	<0,0001	<0,0001–0,0002	<0,0001–0,0002	<0,0001–0,0014	<0,0001–0,0003
Cr	<0,001–0,002	<0,001–0,0018	<0,001–0,0029	<0,001–0,0018	<0,001–0,0018	<0,001–0,0016	<0,001–0,0023	<0,001–0,0029	0,00042–0,0016	<0,001–0,0032
Cu	0,0012–0,0040	0,0040–0,0049	0,0012–0,0055	<0,001–0,0045	0,0012–0,0058	0,0016–0,003	<0,001–0,0084	0,0019–0,0050	0,0012–0,0091	0,0046–0,0051
Fe	<0,01–0,20	<0,01–0,15	0,12–1,47	0,07–0,22	0,20–0,82	0,54–0,66	0,022–0,87	0,06–0,25	0,11–0,29	0,12–0,20
Li	0,0028	0,0058	0,0052–0,0058	0,0053–0,0060	0,012	н.о.	0,0066	0,0079	0,016–0,019	0,0044
Mn	0,0016–0,016	0,0054–0,039	0,017–0,18	0,0032–0,0060	0,02–0,09	0,022–0,19	0,0032–0,025	0,0034–0,011	0,001–0,012	0,023–0,040
Mo	<0,0001–0,00028	<0,0001–0,00051	<0,0001–0,0012	<0,0001–0,00026	<0,0001–0,00044	<0,0001–0,0014	<0,0001–0,00039	<0,00010,00038	0,0016–0,017	<0,0001–0,00038
Ni	<0,001–0,0024	<0,001–0,0017	0,0019–0,0051	<0,001–0,0018	0,0012–0,0024	0,0022–0,0026	<0,001–0,032	0,0015–0,0018	0,0034–0,0052	0,0014–0,0029
P	<0,01	0,02	0,014–0,043	<0,01	0,031	н.о.	0,01	<0,01	<0,01–0,077	<0,01
Pb	<0,0001–0,0023	0,0005–0,0046	<0,0001–0,011	<0,0001–0,0026	0,0006–0,0034	<0,0001–0,0024	<0,0001–0,0065	0,0009–0,0017	0,0005–0,01	0,0019–0,0045
Rb	0,0006	0,0007	0,0014	0,0007	0,0009	н.о.	0,0008	0,0009	0,0014–0,0036	0,0005
Sb	<0,0001	<0,0001–0,00011	<0,0001–0,0003	<0,0001–0,00014	<0,0001–0,00013	<0,0001	<0,0001–0,00023	<0,0001–0,00022	<0,0001–0,005	<0,0001–0,00024
Se	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001–0,0062	<0,001
Si	1,2–2,7	2,3–2,4	0,49–1,6	1,3–4,2	1,6–3,8	1,9–5,6	2,6–7,0	2,7–3,7	1,8–5,1	3,1–3,6
Sn	<0,001–0,0027	<0,001–0,0027	<0,001–0,0027	<0,001–0,0032	<0,0001–0,0029	<0,0001	<0,001–0,0033	<0,001–0,0030	<0,001–0,0026	<0,001–0,0028
Sr	0,22–0,28	0,29–0,38	0,39–0,50	0,77–0,95	0,55–0,70	0,91–0,92	0,70–0,91	0,82–0,96	1,7–2,1	0,34–0,35
Ti	<0,001–0,0019	0,0019–0,0022	<0,001–0,0041	<0,001–0,0029	0,002–0,0044	<0,001–0,017	0,0021–0,026	<0,001–0,0032	<0,001–0,0043	0,0019–0,012
Th	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,00011
U	0,00046	0,00041	0,00085–0,00089	0,00062–0,00069	0,0013	0,0011	0,0011	0,0012	0,0033	0,00025
V	<0,001–0,0005	0,0006–0,0010	0,0021–0,0051	0,0006	<0,001–0,0015	<0,001–0,0018	<0,001–0,0018	0,0008	0,0014–0,0019	<0,001–0,0023
Zn	0,012–0,056	0,015–0,022	0,011–0,031	0,013–0,025	0,014–0,12	0,0022–0,40	0,0022–0,40	0,025	0,015–0,21	0,015–0,018
NO3	1,2–3,9	1,0–3,5	1,6–25	5,8–32	4,0–29	14,0–45	14,0–45	8,1–23	3,1–7,1	0,5–15

Примечание: Содержание Be и Tl во всех пробах ниже предела обнаружения 0,0001 мг/л. н.о. – компонент не определялся.

Содержание микрокомпонентов в водах р. Бодрак, мг/л

Код точки	608	610	612	616	617
Место отбора	у Длинного оврага	брод Кермен	Тещин мост	у водокачки	Скалистое (у моста)
Ag	<0,0001	<0,0001–0,00048	<0,0001–0,00017	0,00017	<0,0001
Al	0,18	0,19–0,25	0,10–0,15	0,39	0,16
As	0,0012	0,004–0,0015	<0,0001–0,0006	0,0006	0,0005
B	0,089	0,13–0,14	0,097–0,12	0,076–1,2	0,092
Ba	0,27	0,40–1,3	0,018–0,21	0,33	0,40
Cd	0,000017	<0,0001–0,0004	<0,0001–0,00007	0,00004	<0,0001
Co	0,0002	0,00011–0,00029	<0,0001–0,0002	0,0005	0,0002
Cr	0,0014	0,0013–0,0086	<0,001–0,0020	0,0031	0,0016
Cu	0,005	0,0037–0,0059	<0,001–0,0049	0,0062	0,0048
Fe	0,16	0,15–0,25	0,17–0,25	0,76	0,15
Li	0,004	0,0013–0,0073	0,0053	0,0070	0,0072
Mn	0,010	0,0049–0,013	0,0082–0,010	0,067	0,0025
Mo	0,00031	0,000213–0,00046	<0,0001–0,0004	0,00032	0,00056
Ni	0,0019	0,0017–0,005	<0,001–0,0013	0,0019	0,001
P	0,024	0,01–0,033	0,0225	<0,01	<0,01
Pb	0,0009	0,0013–0,0023	<0,0001–0,00085	0,0038	0,00059
Rb	0,0007	0,00024–0,00117	0,0011	0,001	0,001
Sb	0,00014	0,00016–0,00054	<0,0001–0,0003	0,0002	0,0002
Se	<0,001	<0,001–0,0011	<0,001	<0,001	<0,001
Si	2,6	3,8–10,0	3,5–3,8	5,0	4,9
Sn	0,0022	<0,001–0,00117	<0,001–0,0036	0,0022	0,0027
Sr	0,39	0,41–0,46	0,42–0,44	0,79	0,82
Ti	0,0023	<0,001–0,0047	<0,001–0,0018	0,0029–0,012	0,0023
Th	<0,0001	0,000073	<0,0001	<0,0001	<0,0001
U	0,00054	0,00084	0,00084	0,001	0,0013
V	0,001	0,00054–0,0013	<0,001–0,00055	0,0015	0,0006
Zn	0,01	0,029–0,051	<0,001–0,019	0,026	0,014
NO3	н.о.	5,6	1,24–10	н.о.	9,4

Примечание: Содержание Be и Tl во всех пробах ниже предела обнаружения 0,0001 мг/л. н.о. – компонент не определялся.

Содержание микрокомпонентов в источниках бассейна р. Бодрак, мг/л

Код точки	100	101	102	103	104	105	106	107	108
Место отбора	Вербочки	Крыничка Тани	Домик лесника	м/у Керменами	Патиль (вост,мчж)	Патиль (сев-зап)	в-е Джидaira	Афениз	каптаж в Ленингр.овр.
Ag	<0,0001–0,086	<0,0001–0,009	<0,0001	<0,0001–0,00076	<0,0001	<0,0001–0,0015	<0,0001	0,0047–0,0048	<0,0001–0,00026
Al	0,01–0,13	0,043–1,2	0,031–0,40	0,018–0,66	0,25–0,53	0,022–0,94	0,16–0,60	0,14–0,19	0,002–0,36
As	<0,0001–0,0002	<0,0001–0,00026	<0,0001–0,0005	<0,0001–0,00096	0,0007–0,0008	<0,0001	<0,0001–0,0001	0,00015–0,0002	<0,0001–0,00042
B	0,046–0,065	0,13–2,5	0,047–0,057	0,080–1,4	0,076–0,086	0,035–0,050	0,047–0,053	0,028–0,080	0,046–2,9
Ba	0,27–0,85	0,032–0,51	0,11–0,94	0,044–0,60	0,23–0,32	0,017–0,47	0,059–0,42	0,70–0,75	0,20–0,29
Cd	<0,0001–0,00032	<0,0001–0,0001	<0,0001–0,00067	<0,0001–0,00016	0,000014–0,000032	<0,0001–0,00013	0,00012–0,00017	0,00002–0,00017	<0,0001–0,00015
Co	<0,0001–0,00014	<0,0001–0,00068	<0,0001–0,00060	<0,0001–0,00044	0,0003–0,0005	<0,0001–0,00021	<0,0001–0,0002	0,0002–0,00026	<0,0001–0,0014
Cr	<0,001–0,0022	<0,0001–0,0032	<0,0001–0,0052	<0,0001–0,0025	0,0017–0,0031	<0,001–0,0019	<0,001–0,0016	0,0020–0,0044	<0,001–0,002
Cu	<0,001–0,0054	0,0016–0,0048	0,0062–0,011	<0,001–0,0049	0,0036–0,0054	<0,001–0,0038	0,0027–0,0034	0,0038–0,0041	0,0005–0,0081
Fe	0,02–0,17	0,13–0,17	0,053–0,33	0,031–0,35	0,31–0,97	0,02–0,13	0,091–0,54	0,15–0,38	<0,01–0,57
Li	0,0060–0,0065	0,0086–0,014	0,013	0,0060–0,0082	0,0045–0,0054	0,0033–0,0036	0,0041	0,0050–0,0077	0,0046–0,0068
Mn	0,0011–0,0051	0,0017–0,025	0,0029–0,019	0,0015–0,016	0,023–0,097	<0,0001–0,0064	0,002–0,014	0,003–0,0065	<0,0001–0,02
Mo	<0,0001–0,00034	<0,0001–0,00015	<0,0001–0,00079	<0,0001–0,00017	0,00015–0,0004	<0,0001–0,0014	<0,0001–0,00016	0,00011–0,00032	<0,0001–0,00034
Ni	<0,001–0,0017	<0,001–0,0038	<0,001–0,0048	<0,001–0,0038	0,0013–0,0017	<0,001–0,0012	0,0008–0,0016	0,0009–0,0042	0,0002–0,0022
P	0,010–0,038	<0,01–0,056	0,026	<0,01–0,016	0,018–0,050	<0,01–0,033	<0,01	0,012–0,033	<0,01–0,059
Pb	<0,0001–0,0051	<0,0001–0,0069	<0,0001–0,013	<0,0001–0,0023	0,0012–0,0013	<0,0001–0,0016	0,0008–0,0016	0,00073–0,0034	<0,0001–0,0064
Rb	0,00033–0,001	0,00028–0,0009	0,0016	0,0002–0,00033	0,0007–0,0013	0,00022–0,0004	0,0006	0,00043–0,0007	0,00026–0,0005
Sb	<0,0001–0,00037	<0,0001–0,0002	<0,0001–0,00016	<0,0001–0,001	<0,0001–0,00011	<0,0001–0,00014	<0,0001	0,0001–0,0002	<0,0001–0,00017
Se	<0,001	<0,001–0,0011	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001–0,001	<0,001
Si	3,9–8,0	4,6–15	7,5–10	4,7–13	5,3–7,3	3,9–11	5,1–6,6	5,8–11	4,8–8,8
Sn	<0,001–0,0012	<0,001–0,0023	<0,001–0,002	<0,001–0,0022	<0,001–0,0011	<0,001–0,0014	<0,001	<0,001–0,0036	<0,001
Sr	0,87–1,2	0,47–0,64	0,78–1,1	0,60–0,74	0,26–0,29	0,22–0,29	0,36–0,39	0,27–0,36	0,94–1,1
Ti	<0,001–0,003	<0,001–0,034	<0,001–0,006	<0,001–0,017	0,003–0,005	<0,001–0,0038	0,002–0,008	0,002–0,0041	<0,001–0,011
Th	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,00033	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
U	0,0011–0,0012	0,0012–0,0014	0,0031	0,0017–0,0023	0,00066–0,00068	0,00058–0,00059	0,0021	0,0022	0,0003
V	<0,001–0,0011	<0,001–0,0016	0,0012–0,0026	0,0002–0,0019	0,001–0,0012	<0,001–0,001	0,0005–0,0015	0,0005–0,0006	0,0006–0,0014
Zn	0,0031–0,022	0,014–0,068	0,0085–0,049	<0,001–0,092	0,15–0,21	<0,001–0,036	0,017–0,035	0,019–0,145	0,0022–0,062
NO3	11-38	2,9-22	3,4-11	2,1-23	15	2-24	1,5-4,0	1,3-10	5,7

Продолжение приложения 5

Код точки	111	112	113	114	115	117	118	121	122
Место отбора	у водокачки	Скалистое у брода	Серебряный родник	у Мраморного ставка	у водопада	пластовое высачивание из-под шоссе	У шлагбаума верховья Бодрак	между Шелудивой и Длинной	Б.Фонтал
Ag	0,00018–0,0161	<0,0001	<0,0001–0,18	<0,0001–0,048	<0,0001	<0,0001–0,00089	<0,001	<0,0001	<0,0001–0,00019
Al	0,15–0,26	0,15–1,8	0,031–1,3	0,11–0,21	0,24–0,26	0,11–0,22	<0,0001–0,128	0,18	0,017–0,14
As	0,00023–0,00036	<0,0001–0,0002	<0,0001	<0,0001–0,00077	0,00051–0,00060	<0,0001–0,00029	<0,0001–0,0002	<0,0001	<0,0001–0,0003
B	0,073–0,149	0,095–0,098	0,045–0,064	0,1–0,42	0,035–0,11	0,079–0,097	0,16–0,2	0,18	0,017–0,17
Ba	0,073–0,70	0,078–0,63	0,073–0,092	0,29–0,59	0,63–0,69	0,075–0,86	0,032–0,33	0,009	0,14–0,48
Cd	<0,0001–0,00016	<0,0001–0,00026	<0,0001–0,00018	0,000015	0,00004	<0,0001	<0,0001–0,0002	<0,0001	<0,0001–0,00015
Co	0,00016–0,00021	<0,0001–0,00019	<0,0001	<0,0001–0,00023	0,00017–0,00030	<0,0001–0,00062	<0,0001–0,00027	<0,0001	<0,0001–0,0002
Cr	0,0026–0,0036	0,0018–0,0027	<0,001–0,0026	<0,001–0,0021	0,0018–0,0042	<0,001–0,0015	<0,001–0,0027	<0,001	<0,001–0,0028
Cu	0,0037–0,011	0,0039	<0,001–0,0042	0,0017–0,0058	0,0045–0,0050	0,0044–0,016	<0,001–0,0028	0,0031	0,0016–0,0045
Fe	0,17–1,1	0,11–1,1	0,078–0,93	0,07–0,19	0,21–0,27	0,18–0,23	0,22–0,85	0,35	0,013–0,44
Li	0,0048–0,0074	0,0054	н.о.	0,012–0,015	0,0076–0,0079	0,0045	0,014	н.о.	0,0089
Mn	0,0059–0,0082	0,0071–0,021	0,0016–0,025	0,006–0,031	0,0047–0,011	0,0054–0,01	0,08–1,2	0,27	<0,0001–0,003
Mo	0,00014–0,00058	<0,0001–0,00024	<0,0001	0,0012–0,0029	0,00056–0,00083	<0,0001–0,00023	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,0015
Ni	0,0018–0,0024	0,00094–0,0018	<0,001–0,0035	0,0021–0,0024	0,0032–0,0034	<0,001–0,0019	<0,001–0,0028	0,0026	<0,001–0,0012
P	<0,01–0,047	0,014	н.о.	0,01–0,014	0,012–0,022	0,032	0,05	н.о.	0,037
Pb	0,001–0,012	0,0005–0,0013	<0,0001–0,0026	<0,0001–0,0024	0,0014–0,0031	<0,0001–0,0026	<0,0001–0,023	<0,0001	<0,0001–0,0096
Rb	0,00031–0,00035	0,0009	н.о.	0,00071	0,00071–0,0013	0,00044	н.о.	н.о.	0,0005
Sb	<0,0001–0,0049	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,00019	0,0002	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,00011
Se	<0,001–0,001	<0,001	<0,001	<0,001–0,004	<0,001–0,0012	<0,001–0,001	<0,001	<0,001	<0,001–0,0019
Si	4,7–8,8	5,3–9,1	6,6–9,6	6,3–14	8,6–14	5,7–9,7	5,3–7	4,8	4,2–5,1
Sn	<0,001–0,0025	<0,001–0,0027	<0,001	<0,001–0,0023	<0,001–0,003	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001–0,001
Sr	0,81–0,82	0,88–0,91	1,5–1,6	1,2–1,5	1,4–1,5	1,2–1,3	0,57–0,69	0,58	0,78–0,83
Ti	0,0037–0,012	0,0018–0,066	<0,001–0,049	<0,001–0,0047	0,0049–0,0036	<0,001–0,006	<0,001	<0,001	<0,001–0,002
Th	0,0003	<0,0001	н.о.	<0,0001	0,0001	н.о.	<0,0001	н.о.	<0,0001
U	0,0012	0,0011	н.о.	0,0035	0,0013	н.о.	<0,0001	н.о.	0,00074
V	0,00054–0,00080	0,00056–0,0032	0,001–0,0036	0,0015–0,0023	0,0010–0,0017	0,00093	<0,001–0,0004	<0,001	0,0006
Zn	0,036–0,092	0,0150,054	<0,001–0,093	0,014–0,06	0,029–0,058	0,0037–0,036	0,0051–0,014	0,0046	0,016–0,025
NO3	2,8-5,8	5,5-15	4,0	9,1-21	5,2-11,5	35	1,96	1-15,9	3,7-11

Продолжение приложения 5

Код точки	123	124	125	126	127	128	130	131	134	135	
Место отбора	Два дерева	Длинный овраг 1	Длинный овраг 3	СельБухра	Присяжная	Присяжная (забр.карьер)	Обсерватория	овраг Шоры	под дамбой Ленингр.ставка	Ключ Прохладное	Балта-Чокрак
Ag	0,000013	<0,0001	<0,0001	<0,005	0,12	11	<0,005	<0,0001	<0,001	0,00025	<0,0001
Al	0,001	0,42	1,0	0,19	0,54	0,98	0,14	0,10–0,14	2,67	0,19	0,106
As	н.о.	<0,0001	<0,0001	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,00010–0,00014	0,0024	0,001	0,001
B	н.о.	0,34	0,031	0,025	0,64	0,89	0,037	0,050–0,054	0,077	0,19	0,07
Ba	0,26	3,6	0,30	0,55	0,12	0,56	0,25	0,50–0,57	0,71	0,66	0,38
Cd	0,000025	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,00013	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Co	0,00028	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,001	<0,001	<0,001	0,00021–0,00030	0,0035	0,00037	0,00022
Cr	0,0157	0,011	0,0025	0,0023	0,0011	<0,001	0,0011	0,00071–0,0015	0,0060	0,0023	0,0018
Cu	0,00239	0,008	0,0046	0,0059	0,0029	0,0027	0,018	0,0019–0,0048	0,019	0,003	0,0027
Fe	0,267	1,2	1,1	0,17	1,5	0,57	0,11	0,081–0,20	5,62	0,15	0,1
Li	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,0050–0,0056	0,0086	0,02	0,0065
Mn	0,00017	0,029	0,016	0,004	0,024	0,02	0,0038	0,0017–0,0050	0,19	0,026	0,0031
Mo	0,00917	0,0037	<0,0001	0,0016	<0,001	<0,001	<0,001	0,00029–0,0003	0,00041	0,0011	0,001
Ni	0,00595	0,0031	0,0031	0,0022	0,0024	0,0022	<0,001	0,0011–0,0026	0,016	0,0018	0,003
P	0,089	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	<0,01	1,2	0,14	<0,01
Pb	0,0000086	0,0033	0,0027	0,0029	0,0033	0,0022	0,0016	0,00046–0,0016	0,0085	0,001	0,00046
Rb	0,00828	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,00055	н.о.
Sb	0,00047	<0,0001	<0,0001	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,0001–0,00013	0,00025	<0,0001	0,00023
Se	н.о.	<0,001	<0,001	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,001	<0,001	0,001	0,0011
Si	5,93	6,1	7,2	4,8	6,9	4	6,8	3,1–4,1	6,4	13	5,3
Sn	0,000016	<0,001	<0,001	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Sr	1,77	0,58	0,27	0,59	0,41	0,43	0,21	0,95–1,12	1,14	1,1	0,41
Ti	0,0611	0,0081	0,015	0,0017	0,01	0,018	<0,001	<0,001	0,017	0,0041	<0,001
Th	0,0000021	н.о.	н.о.	<0,005	н.о.	н.о.	н.о.	<0,0001	0,00022	н.о.	н.о.
U	0,00237	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,00083–0,00084	0,00089	н.о.	0,0014
V	0,00225	0,0018	0,0044	0,013	0,0021	0,0017	<0,001	0,00039–0,00060	0,0085	0,0011	0,0024
Zn	0,00089	0,21	0,046	0,44	0,13	0,019	0,1	0,012–0,020	0,036	0,022	0,012
NO3	1,0	4,5	5,9	22,5	2,56	1,25	4,3–5,7	4,8–10	н.о.	н.о.	н.о.

Содержание микрокомпонентов в подземных водах колодцев бассейна р. Бодрак, мг/л

Код точки	301	302	303	304	305	306	307	308	310	311
Место отбора	Грузинова, 3	Грузинова, 11	у деревенского кладбища	Калинина, 5	Калинина, 9	Калинина, 11	Калинина, 13	Калинина, 19	Шевченко, 8	Шевченко, 11-13
Ag	0,00017	<0,0001–0,028	<0,0001–0,0029	0,00053–0,034	<0,0001	<0,0001–0,00072	0,00035	<0,0001–0,00014	0,0072	<0,0001
Al	0,059	0,061–0,19	0,047–0,21	0,12–0,21	0,097	0,089–0,90	0,10	0,044–0,35	0,11	0,11–0,42
As	0,0004	<0,0001–0,0003	<0,0001–0,00077	<0,0001–0,0007	0,0005	<0,0001–0,0006	0,0006	<0,0001–0,00039	0,00058	<0,0001–0,0004
B	0,12	0,12–0,17	0,085–0,11	0,091–0,12	0,052	0,094–0,13	0,12	0,058–0,088	0,14	0,082–0,10
Ba	0,66	0,099–0,55	0,14–0,60	0,38–2,2	0,43	0,066–0,52	0,06	0,004–0,57	0,31	0,006–0,31
Cd	0,000023	<0,0001–0,00015	<0,0001–0,00013	0,00002	0,000022	<0,0001–0,00041	0,00007	<0,0001–0,00099	<0,0001	<0,0001–0,00013
Co	0,0002	<0,0001–0,0003	<0,0001–0,0002	<0,0001–0,0002	0,0002	0,0002–0,0016	0,0002	<0,0001–0,00025	0,00031	<0,0001–0,0003
Cr	0,0021	<0,001–0,022	0,0026–0,0069	0,0033–0,0044	0,0047	0,0027–0,0084	0,0022	<0,001–0,0061	0,0023	<0,001–0,0027
Cu	0,0059	0,0012–0,0079	<0,001–0,0105	0,0051–0,0079	0,0049	0,0067–0,021	0,012	0,0043–0,022	0,0051	0,0031–0,0065
Fe	0,14	0,10–0,83	0,061–0,49	0,081–0,11	0,17	0,13–1,9	0,08	0,021–1,2	0,11	0,35–1,0
Li	0,0092	0,011	0,0049–0,0098	0,0015	0,0016	0,0011–0,0012	0,0013	0,0021–0,0030	0,0015	0,003
Mn	0,005	0,0030–0,0063	0,0050–0,0085	0,0026–0,0049	0,003	0,0032–0,063	0,0038	<0,0001–0,013	0,0024	0,0091–0,27
Mo	0,00055	<0,0001–0,00095	<0,0001–0,00092	<0,0001–0,00012	0,00027	<0,0001–0,00052	0,00036	<0,0001–0,00045	0,00033	<0,0001–0,00083
Ni	0,0013	0,0011–0,0034	<0,001–0,0043	<0,001–0,0015	0,0014	0,002–0,019	0,0012	<0,001–0,0072	0,003	<0,001–0,0018
P	0,017	<0,01	0,02–0,064	0,02	0,03	0,026–0,050	0,040	0,023–0,050	<0,01–	0,050
Pb	0,0016	0,0011–0,0037	<0,0001–0,0054	0,0012–0,0066	0,00042	0,0041–0,019	0,0017	<0,0001–0,013	0,00057	<0,0001–0,083
Rb	0,0012	0,0012	0,00068–0,00080	0,0012	0,001	0,00052–0,0010	0,0011	<0,0001–0,0014	н.о.	0,002
Sb	0,00014	<0,0001	<0,0001–0,00016	<0,0001–0,00020	0,0001	<0,0001–0,00037	0,0006	<0,0001–0,0001	0,00014	<0,0001–0,0001
Se	<0,001	<0,001	<0,001–0,001	<0,001	0,0011	<0,001–0,0011	<0,001	<0,001–0,0012	<0,001	<0,001
Si	6,1	6,5–7,6	7,5–9,4	8,5–9,5	9,9	7,1–15	6,9	8,1–28	6,4	7,9–10
Sn	0,0022	<0,001–0,0049	<0,001–0,0013	<0,001–0,0041	0,0031	<0,001–0,0011	0,0021	<0,001–0,0021	<0,001	<0,001–0,0028
Sr	1,1	1,1–1,2	0,66–1,5	1,2–1,4	0,91	1–1,4	1	2,2–3,8	1,39	2,3–2,6
Ti	0,001	<0,001–0,002	<0,001–0,75	0,0015–0,0042	0,0017	0,0015–0,0099	0,0017	<0,001–0,0063	<0,001	<0,001–2,1
Th	<0,0001	<0,0001	н.о.	<0,0001	<0,0001	н.о.	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
U	0,003	<0,0001–0,0031	0,0033	0,0009	0,0011	0,0015	0,0015	0,0014	0,0017	0,0013
V	0,0007	<0,001–0,0017	0,0044–0,0135	0,063–0,071	0,055	0,037–1,6	0,049	0,053–0,06	0,048	0,039–0,043
Zn	0,035	0,033–0,18	0,025–0,12	0,034–0,047	0,011	0,037–0,12	0,047	0,0032–0,90	0,032	0,014–0,038
NO3	0,9-100	6-150	20-100	101-200	57-107	92-156	80	120–250	87-96	64-196

Продолжение приложения 6

Код точки	312	313	315	316	317	318	320	321	323	324
Место отбора	Шевченко, 15-17	Грушевый сад	Севастопольская, 6	Севастопольская, 5	Севастопольская, 10 (за киоском)	Севастопольская, 17	Севастопольская, 24	Южная 2-Севастопольская, 26	Севастопольская, 30	Севастопольская, 31
Ag	<0,0001–0,0023	<0,0001–0,00014	0,00039–0,040	<0,0001	<0,0001–0,00040	<0,0001–0,00018	<0,0001	<0,0001–0,0020	<0,0001–0,036	<0,0001–0,00019
Al	0,03–0,21	<0,01–0,40	0,16–1,1	0,93	0,13–0,31	0,17–0,23	0,20	0,012–0,19	0,062–0,49	0,17–0,22
As	<0,0001–0,0003	<0,0001–0,0005	<0,0001–0,0015	<0,0001	<0,0001–0,0006	<0,0001–0,001	<0,0001	<0,0001–0,0006	<0,0001–0,0003	<0,0001–0,0017
B	0,039–0,054	0,093–0,15	1,2–3,9	3,9	<0,001–0,11	0,078–0,092	0,41	0,067–0,086	0,22–0,85	0,22
Ba	0,022–0,36	0,081–0,44	0,082–0,28	0,043	0,074–0,34	0,047–0,39	0,06	0,032–0,67	0,082–0,76	0,071–0,16
Cd	<0,0001–0,00018	<0,0001–0,00024	0,00002–0,00014	0,0013	0,000021–0,00034	0,00003–0,00019	<0,0001	<0,0001–0,00029	0,000029	0,000049
Co	<0,0001–0,0003	<0,0001–0,00023	<0,0001–0,0010	0,0012	<0,0001–0,0003	<0,0001–0,0004	0,001	<0,0001–0,0002	<0,0001–0,0002	<0,0001–0,0003
Cr	<0,001–0,0022	<0,001–0,0026	0,0012–0,0021	0,0041	0,0021–0,0045	0,0029–0,0050	<0,001	0,0012–0,0046	<0,001–0,0012	<0,001–0,0023
Cu	0,0028–0,0059	<0,001–0,0057	0,0026–0,025	0,028	0,0022–0,0053	0,0048–0,0061	0,0028	0,0016–0,0051	0,0058–0,0059	0,0039–0,0074
Fe	0,07–0,13	0,016–0,25	0,20–0,69	2,4	0,1–0,32	0,06–0,65	0,45	0,044–0,082	0,051–0,30	0,22–0,49
Li	0,0037	0,0051–0,0073	0,0038	н.о.	0,0033–0,0039	0,002–0,0025	н.о.	0,0022–0,0023	0,020	0,011
Mn	0,0011–0,0031	0,0046–0,033	0,004–0,024	0,21	0,003–0,006	0,0068–0,010	0,088	<0,0001–0,0035	0,006–0,0071	0,099–0,10
Mo	<0,0001–0,0011	<0,0001–0,00039	0,0041–0,007	0,0052	<0,0001–0,00056	0,00031–0,001	0,0019	<0,0001–0,00034	0,0002–0,0016	<0,0001–0,0012
Ni	0,0012–0,0015	<0,001–0,0031	0,0023–0,0065	0,009	0,0014–0,0016	0,001–0,013	0,0039	<0,001–0,0023	0,0025–0,0028	0,0022–0,0047
P	0,02	0,020–0,033	<0,01	н.о.	<0,01–0,023	0,020–0,051	н.о.	<0,01–0,012	0,071	0,39
Pb	0,00057–0,0029	<0,0001–0,003	0,0007–0,02	0,012	0,0005–0,0044	0,0008–0,0030	<0,0001	<0,0001–0,0035	0,062–0,49	0,0016–0,0038
Rb	0,0022	0,00037–0,0009	0,0019	н.о.	0,0007–0,0008	0,00049–0,0009	н.о.	0,00033–0,001	0,0022	0,0037
Sb	<0,0001–0,0001	<0,0001–0,0002	<0,0001–0,00065	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,0002	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,00076	<0,0001–0,00015
Se	<0,001–0,0017	<0,001	<0,001–0,011	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Si	7,7–9,0	5,2–13	6,6–7,8	7,3	7,7–9,9	8,5–19	2,0	8,9–18	4,3–7,2	4,1–5,1
Sn	<0,001	<0,001–0,0014	0,0031–0,074	н.о.	<0,001–0,0027	<0,001–0,0023	<0,001	<0,001–0,0028	<0,001–0,0014	<0,001–0,001
Sr	1,9–2,3	0,97–1,4	0,67–0,76	1,3	1,6–1,7	1,1–1,3	0,86	1,4–1,8	0,94–0,95	0,63–0,83
Ti	<0,001–3,3	<0,001–0,55	0,002–0,016	0,0098	0,002–0,0047	0,002–0,0044	<0,001	<0,001–1,9	<0,001–0,0073	<0,001–0,0022
Th	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,00013	н.о.	<0,0001	<0,0001	н.о.	<0,0001	<0,0001	<0,0001
U	0,0019	0,0016	<0,0001	н.о.	0,0015	0,0012	н.о.	0,0012	0,0011–0,0019	0,0017
V	0,026–0,032	<0,001–0,015	0,0011–0,0027	0,0026	0,032–0,047	0,047–0,052	<0,001	0,04–0,051	0,0005–0,0011	0,0013
Zn	0,014–0,026	0,0057–0,15	<0,001–0,018	0,72	0,015–0,51	0,015–0,18	0,0093	0,0058–0,056	0,23–1,3	0,12–0,13
NO3	61-150	7,4-100	1,6-10	11-16	81-190	100-121	2,7-4,4	84-171	44-160	17-45

Продолжение приложения 6

Код точки	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	336
Место отбора	Севастопольская, 32	Севастопольская, 35	Южная, 7	Садовая, 15	у Сергея (al)	у Сергея (es)	свиноферма	У Лиды	у стар. татарского кладбища	Устье Джидaira	Скалистое, Зеленая 8
Ag	<0,0001–0,00017	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,047	<0,0001–0,00016	<0,0001	0,0002	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,042
Al	0,03–0,25	0,025	0,26	0,09	0,027–0,39	0,13–0,18	0,10	0,20	0,37	1,9	0,039–0,22
As	<0,0001–0,001	<0,0001	0,0016	<0,0001	<0,0001–0,0007	<0,0001–0,0006	<0,0001	0,00043	0,0007	<0,0001	<0,0001–0,0003
B	0,15–0,41	0,14	0,12	0,15	0,12–1,7	0,40–0,45	0,062	0,10	0,30	0,15	0,066–0,14
Ba	0,15–1,3	<0,0001	0,80	0,047	0,049–0,052	0,023–0,057	0,10	0,46	0,42	0,13	0,074–0,27
Cd	0,00002–0,000029	0,00026	0,00002	0,00023	0,00018–0,00033	0,000057	0,0001	<0,0001	0,000016	0,00042	0,00003
Co	<0,0001–0,0002	<0,0001	0,0004	<0,0001	<0,0001–0,0003	<0,0001–0,0002	<0,0001	0,0004	0,0004	<0,0001	<0,0001–0,0002
Cr	<0,001–0,0026	<0,001	0,0031	<0,001	<0,001–0,0033	<0,001–0,0018	0,0017	0,0088	0,0033	0,0041	<0,001–0,0013
Cu	0,0013–0,0062	0,0028	0,0073	0,0090	<0,001–0,0046	<0,001–0,0034	0,0030	0,0041	0,0079	0,0065	0,005–0,0062
Fe	0,095–0,36	0,19	0,23	0,18	0,053–0,19	0,0043–0,19	0,14	0,69	0,62	1,6	0,038–0,43
Li	0,019	н.о.	0,0096	н.о.	0,14	0,12	н.о.	0,0071	0,0039	н.о.	0,0066
Mn	0,0018–0,0080	0,020	0,009	0,012	0,0057–0,011	0,0060–0,0069	0,012	0,0085	0,057	0,054	0,002–0,030
Mo	<0,0001–0,00088	<0,0001	0,0015	<0,0001	<0,0001–0,00039	<0,0001–0,0003	<0,0001	0,00068	0,00018	<0,0001	<0,0001–0,0011
Ni	<0,001–0,0015	<0,001	0,0028	0,0017	<0,001–0,0038	<0,001–0,0026	0,0015	0,0025	0,0023	0,0064	<0,001–0,0017
P	0,13–0,18	н.о.	0,043	н.о.	0,046	0,029	н.о.	0,044	0,054	н.о.	0,02
Pb	<0,0001–0,0011	<0,0001	0,0025	0,0011	<0,0001–0,0045	<0,0001–0,0013	0,0020	0,0020	0,0014	0,011	<0,0001–0,0084
Rb	<0,0001–0,0013	н.о.	0,0009	н.о.	0,0054	0,0043	н.о.	0,00035	0,0020	н.о.	0,0010
Sb	<0,0001–0,00031	<0,0001	0,00039	<0,0001	<0,0001–0,00093	<0,0001–0,00047	<0,0001	0,00012	<0,0001	<0,0001	<0,0001–0,00029
Se	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001–0,0013	<0,001–0,0011	<0,001	0,0017	<0,001	<0,001	<0,001
Si	5,0–6,2	4,3	6,6	5,9	3,9–8,0	5,3–5,8	10	15	4,1	8,9	5,1–7,2
Sn	<0,001–0,0012	<0,001	0,0024	<0,001	<0,001–0,0036	<0,001–0,0011	<0,001	<0,001	0,0026	<0,001	<0,001–0,0014
Sr	0,70–0,76	0,68	1,2	0,54	0,60–1,4	0,63–1,2	1,2	1,3	0,81	0,49	1,1
Ti	<0,001–0,005	<0,001	2,8	<0,001	<0,001–0,016	<0,001	<0,001	0,0042	<0,001	0,065	<0,001–0,0047
Th	<0,0001	н.о.	<0,0001	н.о.	0,00012	<0,0001	н.о.	н.о.	<0,0001	н.о.	<0,0001
U	0,0019–0,0021	н.о.	0,0026	н.о.	0,0042	0,0023	н.о.	н.о.	0,0027	н.о.	0,0015
V	<0,001–0,0011	<0,001	0,0039	0,0011	0,0026	<0,001–0,0011	0,016	0,003	0,0009	<0,001–0,0046	<0,001–0,0011
Zn	0,010–0,045	0,044	0,022	0,11	<0,001–0,027	0,0088–0,017	0,015	0,079	0,024	0,92	0,0099–0,12
NO3	37–92	11–16	9,0	25–109	6,0	21–24	н.о.	37,5	2,3–18	10	7,3

Продолжение приложения 6

Код точки	338	339	340	341	344	345	346	349	353	359	361
Место отбора	Скалистое, Ленина 18	Скалист., Ленина 19	Скалист. Ленина 21	Скалистое Ленина 22а	Скалистое, Пушкина 1а	Скалистое, Пушкина 3	Скалистое, Пушкина 8	Скалистое, Пушкина 21	Скалистое, Молодежная, 11	Прохладное, Студенческая 23	Прохладное, Сандулова 19
Ag	<0,0001–0,12	<0,0001	<0,0001	0,0041	<0,0001	<0,0001–0,0002	0,00012–0,044	<0,0001–0,00041	<0,0001	0,014	<0,0001
Al	0,11–0,15	0,11	2,1	0,14	0,016–0,70	0,17–1,2	0,11–0,36	0,13–0,22	0,12	0,34	0,17
As	<0,0001–0,00045	0,0005	0,0013	0,00042	<0,0001–0,0046	<0,0001–0,0004	<0,0001–0,0006	<0,0001–0,0004	<0,0001	<0,0001	0,00044
B	0,076–0,99	0,11	0,1	0,11	0,069–0,098	0,0074–0,084	0,1–0,14	0,0077–0,097	0,11	0,097	0,16
Ba	0,22–2,2	0,11	0,19	0,51	0,055–0,41	0,14–0,21	0,066–0,51	0,12–0,16	0,45	1,8	0,5
Cd	<0,0001–0,00015	0,000027	0,00008	<0,0001	<0,0001	0,000036–0,0011	0,000032–0,00044	0,000016	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Co	<0,0001–0,00018	0,0002	0,0015	0,00012	<0,0001–0,0007	0,0003–0,0017	0,00016–0,0006	<0,0001–0,0003	<0,0001	<0,0001	0,0003
Cr	0,0014–0,0015	0,0017	0,0061	0,0017	0,0013–0,0058	0,0017–0,0019	0,00016–0,014	0,0013–0,0022	<0,001	0,0063	0,003
Cu	0,0049–0,0066	0,0055	0,0081	0,0024	<0,001–0,021	0,0049–0,084	0,018–0,033	0,0030–0,0046	0,0049	0,019	0,0034
Fe	0,08–0,23	0,16	2,9	0,12	0,041–1,2	0,17–4,8	0,13–0,85	0,18–0,32	0,05	0,41	0,15
Li	0,0071	0,0083	0,010	0,0046	0,0043	0,0081	0,0063–0,0068	<0,001–0,0088	н.о.	н.о.	0,017
Mn	0,0017–0,0074	0,016	0,078	0,010	0,0079–0,029	0,018–0,082	0,0037–0,11	0,0034–0,016	0,0036	0,0027	0,010
Mo	0,00072–0,0021	0,0010	0,0011	0,00068	<0,0001–0,0042	0,00048–0,0025	<0,0001–0,00041	<0,0001–0,00059	0,0016	0,0020	<0,0001
Ni	0,002	0,0018	0,0072	0,0014	0,0027–0,0063	0,0016–0,052	0,0016–0,0068	<0,001–0,002	0,0054	0,0027	0,0036
P	0,053	0,036	0,12	0,047	1,5	<0,01–0,051	0,048–0,097	0,039	н.о.	н.о.	0,015
Pb	0,0017–0,017	0,001	0,0039	0,0013	0,0012–0,0025	0,0025–0,045	0,0012–0,007	0,003–0,0051	<0,0001	0,0047	<0,0001
Rb	0,00047	0,0011	0,0036	0,0004	н.о.	0,0012	0,00057	0,0011	н.о.	н.о.	0,17
Sb	<0,0001–0,0011	0,00019	0,00025	<0,0001	<0,0001–0,0011	<0,0001–0,00019	<0,0001–0,00028	<0,0001–0,00016	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Se	<0,001–0,0036	0,0015	0,0016	0,0012	<0,001	<0,001–0,001	<0,001	<0,001–0,0011	<0,001	<0,001	<0,001
Si	6,6–10	5,8	9,1	10	4,5–8,4	6,8–7,7	5,5–13	6,8–8,3	8,3	4,8	11
Sn	<0,001	0,0022	0,002	<0,001	<0,001	<0,001–0,0011	<0,001	<0,001–0,0011	<0,001	<0,001	<0,001
Sr	1,0–1,1	0,91	0,94	0,92	0,26–1,5	1,3–1,4	0,99–1,3	1,3–1,4	1,7	1,6	1,3
Ti	<0,001–0,0062	0,001	0,022	0,0029	<0,001–0,012	0,002–0,013	<0,001–0,0059	0,0012–0,002	<0,001	0,0062	0,0038
Th	н.о.	0,00036	<0,0001	н.о.	<0,0001	0,00012	0,00024	<0,0001	н.о.	н.о.	н.о.
U	н.о.	0,0018	0,0018	н.о.	0,00019	0,0019	0,0013	0,0021	н.о.	н.о.	н.о.
V	0,00079	0,0004	0,0042	0,00045	<0,001–0,0084	0,0009–0,0037	<0,001–0,0015	<0,001–0,0008	0,002	0,0013	0,0011
Zn	0,069–0,18	0,060	0,062	0,11	0,033–0,084	0,045–3,5	0,071–0,31	0,015–0,12	0,017	0,091	0,069
NO3	17–38	14–37	20	10	1,2–25	20–44	5,7	22–55	н.о.	36–46	5–27

Примечание: Содержание Be и Tl во всех пробах ниже предела обнаружения 0,0001 мг/л. н.о. – компонент не определялся.

**Коэффициенты концентрации химических элементов
в подземных водах бассейна р. Бодрак**

Химический элемент	T_3-J_1 tv	T_3-J_1 es	J_2 b	K_1	P_2	Замедленный водообмен
Ag	4,48	3,45	13,79	3,45	31,03	137,93
Al	0,65	0,57	0,68	0,72	1,22	3,94
As	0,63	0,77	0,63	0,10	0,87	1,21
B	3,59	10,29	2,15	1,20	6,22	93,30
Ba	20,41	2,04	16,33	15,31	58,16	14,29
Cd	0,47	0,29	0,76	0,53	0,35	7,65
Co	0,48	0,36	0,48	0,36	0,60	1,45
Cr	0,59	0,41	1,10	0,55	0,59	1,41
Cu	0,72	0,36	1,61	0,52	0,72	5,02
Fe	0,55	0,26	0,60	0,36	0,66	4,39
Li	0,79	8,57	0,21	0,34	0,57	0,27
Mn	4,45	0,12	0,32	0,10	0,26	4,25
Mo	0,23	0,20	0,23	0,27	0,54	3,48
Ni	0,79	0,94	1,03	0,42	0,94	2,72
Робщ	0,89	0,50	0,57	0,30	1,11	0,09
Pb	1,90	0,41	1,58	0,45	1,22	9,05
Rb	0,27	1,94	0,54	0,18	0,63	0,86
Sb	0,72	0,98	0,65	0,65	1,11	1,63
Se	3,11	4,00	3,11	2,89	5,11	24,44
Si	0,76	0,68	1,17	0,85	0,95	0,96
Sn	3,41	4,39	4,88	3,41	4,88	7,56
Sr	4,86	4,97	8,38	1,62	6,11	7,03
Th	0,12	0,12	0,21	0,12	0,50	0,31
Ti	0,28	0,09	0,37	0,28	0,47	1,50
U	0,18	0,68	0,41	0,50	0,53	0,29
V	0,65	0,52	28,26	0,45	0,97	1,74
Zn	0,50	0,29	4,71	1,12	1,76	21,18

Интенсивность водной миграции элементов в подземных водах бассейна р. Бодрак

Кларк %массовый	Элемент	T ₃ -J ₁ tv	T ₃ -J ₁ es	J ₂ b	K ₁	P ₂	Замедленный водообмен	В зоне гипергенеза
0,0000073	Ag	19,776	11,579	71,890	28,367	194,184	258,233	9,217
8,07	Al	0,002	0,002	0,003	0,005	0,007	0,006	0,008
0,00018	As	0,802	0,751	0,948	0,230	1,575	0,655	2,668
0,0009	B	18,508	40,384	13,120	11,505	45,501	204,219	10,776
0,047	Ba	0,945	0,072	0,893	1,322	3,820	0,281	0,097
0,000017	Cd	0,523	0,249	1,003	1,096	0,556	3,604	2,252
0,0023	Co	0,019	0,011	0,023	0,027	0,034	0,025	0,084
0,0093	Cr	0,020	0,011	0,045	0,036	0,029	0,021	0,072
0,0053	Cu	0,084	0,032	0,223	0,113	0,119	0,249	0,244
5,33	Fe	0,006	0,002	0,008	0,008	0,011	0,021	0,024
0,0025	Li	0,489	4,057	0,157	0,394	0,504	0,072	1,299
0,09	Mn	0,271	0,006	0,023	0,011	0,023	0,110	0,127
0,00012	Mo	0,426	0,282	0,514	0,949	1,431	2,749	3,886
0,007	Ni	0,041	0,037	0,064	0,041	0,070	0,061	0,110
0,10	P_{обм}	0,057	0,025	0,043	0,035	0,101	0,002	0,133
0,0013	Pb	0,359	0,059	0,353	0,159	0,327	0,725	0,394
0,011	Rb	0,006	0,033	0,014	0,008	0,020	0,008	0,047
0,00003	Sb	4,072	4,226	4,373	6,903	8,925	3,927	11,833
0,0000073	Se	21,297	20,841	25,161	36,878	49,625	71,014	14,620
27,99	Si	0,025	0,017	0,044	0,051	0,044	0,013	0,067
0,00023	Sn	0,676	0,661	1,141	1,261	1,370	0,635	0,414
0,037	Sr	2,701	2,102	5,496	1,679	4,810	1,656	1,160
0,001	Th	0,006	0,004	0,012	0,010	0,033	0,006	0,097
0,53	Ti	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005
0,00026	U	0,256	0,748	0,706	1,354	1,090	0,181	3,034
0,0012	V	0,093	0,056	4,789	0,121	0,197	0,106	0,300
0,0068	Zn	0,278	0,124	3,087	1,157	1,390	4,990	1,160
2,26	Mg	1,548	4,301	2,647	0,632	1,303	0,202	1,910
3,81	Ca	3,378	1,087	3,440	4,750	4,179	0,584	2,673
2,38	Na	2,268	4,173	2,773	1,105	2,065	13,861	4,436
2,13	K	1,032	0,425	0,197	0,233	0,569	0,177	0,500
0,033	S	155,245	51,226	71,166	56,059	52,820	119,009	176,004
0,018	Cl	241,224	315,086	349,136	226,640	388,250	2323,651	605,826
0,002	N	62,669	28,620	1821,388	93,491	1599,939	21,277	18,138

Значения факторов в точках наблюдения
(выборка 1 – макрокомпоненты, минерализация и нитраты)

N	Code	FACTOR1	FACTOR2	FACTOR3
1	1	0.22259	-0.34061	0.87178
2	1	0.49710	-0.00118	0.32116
3	1	0.12685	-0.28320	0.83974
4	1	-0.55986	0.17863	0.56303
5	1	-0.80488	0.55936	0.33741
6	1	-1.39457	0.75355	0.82044
7	2	-0.17447	0.12722	-0.20717
8	2	-0.73974	-0.58608	0.53753
9	2	-0.32962	-0.32459	-0.51047
10	2	-0.43100	-0.37478	-0.43685
11	3	-1.02013	0.65688	-1.54110
12	3	-1.62655	-0.61525	-0.09627
13	3	-1.30511	-0.94101	-0.18095
14	4	0.67932	-0.10505	-0.02964
15	4	0.47851	0.08145	0.49344
16	4	0.41177	0.06886	0.49633
17	4	0.12685	-0.28320	0.83974
18	4	0.43561	-0.45120	-0.23967
19	4	0.35913	-0.57089	-0.06222
20	4	0.10763	-0.71633	0.22863
21	5	0.94722	-0.02344	-0.84922
22	5	0.01457	-0.86104	-0.17743
23	5	0.05230	-0.83978	-0.07009
24	6	1.31394	0.26428	-0.88445
25	6	1.36278	0.58101	-0.51714
26	6	1.31089	0.05574	-0.57177
27	6	1.28994	0.15320	-0.69416
28	6	1.29232	0.08986	-0.37330
29	6	1.47863	0.74799	-1.36804
30	6	1.27045	-0.11026	-0.44066
31	6	0.60238	-0.87544	0.39155
32	6	0.29298	-1.04824	0.45669
33	6	0.57582	-0.91531	0.41381
34	6	0.80120	-0.41377	-0.32044
35	6	0.52458	-0.24996	-0.16912
36	6	0.44228	-0.93066	0.27772
37	7	0.02294	0.12234	2.02378
38	7	-0.08877	1.53121	0.13693
39	7	-0.63491	1.06840	0.04773
40	7	-0.75758	0.55816	2.52169
41	7	-0.45134	0.95228	0.14967
42	7	-0.42240	0.77515	1.10273
43	7	-0.43114	1.16417	2.56603
44	7	-0.45574	1.13084	-0.27529
45	7	-0.18998	1.07526	1.21436
46	7	-0.83876	1.91097	1.57186
47	8	-2.70297	-0.80371	-0.62720
48	8	-2.06700	1.28477	-2.81678
49	8	-1.82509	1.99502	-2.77582
50	9	-0.01447	0.04603	-0.81041
51	9	-1.95841	-4.80031	-0.38980
52	10	1.42034	-0.09339	-0.59550
53	10	1.35335	-0.28280	-0.47811
54	10	1.41021	-0.09118	-0.71475

Значения факторов в точках наблюдения
(выборка 2 – макрокомпоненты, микроэлементы, минерализация и нитраты)

N	Code	FACTOR1	FACTOR2	FACTOR3
1	1	0.14551	-0.44726	-1.14167
2	1	0.39694	-0.01833	-0.77829
3	1	-1.68617	3.10854	-0.09786
4	1	-0.21010	-0.32670	0.41158
5	1	-0.59608	-0.21294	0.86703
6	1	-0.81234	-0.48797	0.76320
7	2	-0.20937	0.73909	1.28335
8	2	-0.30013	-0.23426	0.81092
9	2	0.38139	-0.66673	0.95132
10	2	-0.48382	-0.23310	-0.19993
11	3	-1.34663	-1.78793	-0.80610
12	3	-1.01251	-0.91119	0.18292
13	3	-0.93337	-1.29485	-1.07991
14	4	-0.20490	1.40065	-1.86290
15	4	0.38003	-0.01252	-0.76001
16	4	-0.00359	0.36751	0.09088
17	4	-1.68617	3.10854	-0.09786
18	4	-0.22550	0.91236	-0.57860
19	4	0.03833	-0.34929	-1.37735
20	4	0.09725	-0.55711	-1.15722
21	5	1.24266	0.06054	0.17848
22	5	-0.02387	-0.49497	-1.29765
23	5	0.12668	0.14973	0.08474
24	6	0.92253	1.24255	0.23253
25	6	1.46247	0.40780	0.31311
26	6	1.25618	-0.26407	-1.58513
27	6	0.93339	0.23042	-1.54969
28	6	1.87763	-0.11456	0.75633
29	6	1.88671	-0.02667	0.59156
30	6	1.49543	0.53952	0.61619
31	6	0.15815	0.54839	-1.34715
32	6	1.01839	-0.22830	0.97258
33	6	1.17679	-0.15527	0.72992
34	6	1.45189	-0.11333	0.94762
35	6	0.99395	-0.50131	0.55279
36	6	0.41005	0.83591	1.03908
37	7	-0.11172	0.01167	-0.29588
38	7	0.13566	-0.14581	1.43987
39	7	-0.08336	-0.45660	1.39863
40	7	-0.98186	0.07666	0.10032
41	7	-1.71891	2.22336	0.56922
42	7	-0.57908	0.42982	0.96047
43	7	-0.36346	-0.09808	0.70491
44	7	0.02309	-0.41165	1.27771
45	7	-1.07522	1.06206	0.53749
46	7	-0.70854	-0.38595	0.89028
47	8	-1.52368	-1.33118	1.40904
48	8	-1.42676	-2.03486	-0.57304
49	8	-0.76457	-2.13149	1.14600
50	9	-0.33394	-0.84999	-1.73096
51	9	-2.05909	-0.91198	-1.09318
52	10	1.11877	-0.07160	-1.69445
53	10	0.83697	0.44920	-1.95858
54	10	1.49790	0.36355	0.25335

Основные формы миграции химических элементов в подземных водах и атмосферных осадках бассейна р.Бодрак (в % от общего содержания элемента)

	Формы миграции	Активный водообмен				Р ₂	Замедленный водообмен	Атмосферные осадки
		T ₃ -J ₁ tv	T ₃ -J ₁ es	J ₂ b	K ₁			
Al	Al(OH) ₄ ⁻	85	87	85	90	85	85	90
	Al(OH) ₂ ⁺	10	8	9	6	10	10	5
	Al(OH) ₃	4	4	5	4	5	4	5
	AlOH ²⁺	1	0	1	0	1	1	0
B	H ₃ BO ₃	99	99	99	99	100	99	99
	H ₂ BO ₃ ⁻	1	1	1	1	0	1	1
Ba	Ba ²⁺	88	89	90	93	92	88	98
	BaSO ₄	10	7	7	5	6	10	2
	BaOH ⁺	1	4	3	2	2	1	0
C(4)	HCO ₃ ⁻	71	79	78	82	79	71	81
	CO ₂	16	18	19	16	20	16	19
	MgHCO ₃ ⁺	9	2	1	1	0	9	0
	CaHCO ₃ ⁺	2	1	1	0	1	2	0
	NaHCO ₃	1	0	1	0	0	1	0
	MgCO ₃	1	0	0	0	0	1	0
Ca	Ca ²⁺	94	91	93	95	95	94	99
	CaHCO ₃ ⁺	4	6	4	3	3	4	1
	CaSO ₄	2	3	3	2	2	2	0
Cd	Cd ²⁺	46	74	80	85	82	46	98
	CdHCO ₃ ⁺	45	16	11	9	9	45	1
	CdCl ⁺	3	7	6	3	6	3	1
	CdSO ₄	3	3	3	2	3	3	0
	CdCO ₃	3	0	0	0	0	3	0
Cl	Cl ⁻	99	100	100	100	100	99	100
	FeCl ⁺	1	0	0	0	0	1	0
Fe(2)	Fe ²⁺	77	56	67	71	71	77	96
	FeHCO ₃ ⁺	18	40	30	25	26	18	3
	FeCO ₃	3	3	2	2	2	3	1
	FeSO ₄	1	1	2	1	1	1	0
	FeCl ⁺	1	0	0	0	0	1	0
K	K ⁺	100	100	100	100	100	100	100
Li	Li ⁺	100	100	100	100	100	100	100
Mg	Mg ²⁺	94	90	93	94	94	94	99
	MgHCO ₃ ⁺	4	7	5	4	4	4	1
	MgSO ₄	2	3	2	2	2	2	0
Mn(2)	Mn ²⁺	74	55	65	69	70	74	96
	MnHCO ₃ ⁺	16	34	26	22	22	16	3
	MnCO ₃	4	10	7	8	6	4	1
	MnSO ₄	4	1	2	1	1	4	1
	MnCl ⁺	2	0	0	0	0	2	0
N(5)	NO ₃ ⁻	100	100	100	100	100	100	100
Na	Na ⁺	100	99	100	100	100	100	100
	NaHCO ₃	0	1	0	0	0	0	0
Pb	PbCO ₃	76	84	83	85	82	76	59
	PbHCO ₃ ⁺	12	12	12	10	12	12	28
	Pb ⁺²	7	2	4	4	4	7	7
	Pb(CO ₃) ₂ ²⁻	2	1	1	1	1	2	5
	PbOH ⁺	1	0	0	1	1	1	1
	PbSO ₄	1	0	0	0	0	1	0
	PbCl ⁺	1	0	0	0	0	1	0

S(6)	SO ₄ ²⁻	77	75	78	83	81	77	97
	MgSO ₄	8	19	12	14	4	8	2
	CaSO ₄	7	5	9	2	15	7	1
	NaSO ₄ ⁻	6	1	1	0	0	6	0
	KSO ₄ ⁻	1	0	0	0	0	1	0
	SrSO ₄	1	0	0	0	0	1	0
Si	H ₄ SiO ₄	100	100	100	100	100	100	100
Sr	Sr ²⁺	94	91	93	95	95	94	99
	SrHCO ₃ ⁺	4	7	4	3	3	4	1
	SrSO ₄	2	2	3	2	2	2	0
Zn	Zn ²⁺	67	42	53	56	59	67	93
	ZnHCO ₃ ⁺	19	36	29	25	26	19	3
	ZnCO ₃	9	18	14	16	13	9	2
	Zn(CO ₃) ₂ ²⁻	3	3	2	1	1	3	1
	ZnSO ₄	1	1	1	1	1	1	1
	ZnOH ⁺	1	0	0	0	0	1	0

Приложение 12

Стабильные изотопы в составе природных вод Горного Крыма

Код точки	Дата отбора	Местоположение	Тип источника	δ ¹⁸ O, ‰	δ ² H, ‰	N	E	Лаборатория
100	июль, 2006	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-9,3	не опр.	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ВСЕГЕИ
610	июль, 2006	Бодрак у г.Кермен	река	-8,7	-68	44°46'22,7"	34°00'30,7"	ВСЕГИНГЕО
111	июль, 2006	Эмиров	родник	-9,3	-61,5	44°47'01,2"	33°59'34,9"	ВСЕГЕИ
101	июль, 2006	Постоялый двор	родник	-9,4	-61,3	44°46'70,7"	34°00'21,2"	ВСЕГЕИ
105	июль, 2006	Патиль	родник	-9,4	-61	44°46'37,0"	33°59'29,1"	ВСЕГЕИ
_002	июль, 2006	Вербочки	родник	-9,5	-64,3	44°46'18,3"	33°59'46,1"	ВСЕГЕИ
308	июль, 2006	Калинина, д. 19	колодец	-9,2	-59,3	44°47'21,0"	33°59'38,8"	ВСЕГЕИ
314	июль, 2006	Севастопольская, д.4	колодец	-9,6	-63,7	44°47'30,3"	33°59'21,1"	ВСЕГЕИ
100	14.07.09	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-7,9	н.о.	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ВСЕГЕИ
100	20.06.11	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-3,8	-26,8	44°47'10,0"	33°59'59,1"	РЦ «Геомодель»
100	30.06.11	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-5,73	-39,3	44°47'10,0"	33°59'59,1"	РЦ «Геомодель»
616	20.06.11	Бодрак у водокачки	река	-7,81	-53,4	44°46'18,3"	33°59'46,1"	РЦ «Геомодель»
100	10.12.11	д. Скалистое	атм.осадки	-4,49	-36,3	44°47'10,0"	33°59'21,1"	РЦ «Геомодель»
617	10.12.11	Бодрак, д.Скалистое	река	-7,2	-48,8	44°48'23,0"	33°58'41,1"	РЦ «Геомодель»
505	05.07.12	Мангуш	ставок	-4,1	-42	44°46'11"	34°00'34"	РЦ «Геомодель»
501	05.07.12	Воронеж	ставок	-2,8	-36	44°46'32"	33°59'39"	РЦ «Геомодель»
514	16.07.12	Кугульчик	ставок	-4,5	-42	44°44'26"	34°3'56"	РЦ «Геомодель»
516	16.07.12	Музаран (Мугачи)	ставок	-3,4	-37	44°46'01"	34°01'45"	РЦ «Геомодель»
512	16.07.12	Широкий Яр	ставок	-8,2	-60	44°45'50"	34°01'07"	РЦ «Геомодель»
509	23.07.12	Мраморный	ставок	0	-17	44°48'43"	33°58'50"	РЦ «Геомодель»
	19.07.12	Аммонитовый	ставок	-3,7	-43	44°46'43"	34°00'14"	РЦ «Геомодель»
103	08.07.12	Кермен	родник	-8,5	-57	44°46'26"	34°0'42"	РЦ «Геомодель»
107	09.07.12	Афениз	родник	-9,4	-63	44°47'22,29"	34°01'48,60"	РЦ «Геомодель»

102	09.07.12	домик лесника	родник	-9	-61	44°47'31,49"	34°00'21,88"	РЦ «Геомодель»
105	21.06.12	Патиль	родник	-8,1	-56	44°46'18,99"	33°59'44,51"	РЦ «Геомодель»
	23.06.12	Успенский монастырь	родник	-9,1	-62	44°44'39,60"	33°54'37,25"	РЦ «Геомодель»
002	26.06.12	Вербочки	родник	-8,3	-62	44°46'21,75"	33°59'16,16"	РЦ «Геомодель»
121	12.06.12	Шелудивая	родник	-6,1	-50	44°45'37,22"	33°59'45,59"	РЦ «Геомодель»
133	14.07.12	Балта-Чокрак	родник	-8,6	-59	44°47'26,64"	33°57'25,91"	РЦ «Геомодель»
120	15.07.12	на г. Лесистая	родник	-9,3	-63	44°47'09,03"	34°01'01,98"	РЦ «Геомодель»
309	06.07.12	Шевченко 5	колодец	-7,9	-58	44°47'15,8"	33°59'44,2"	РЦ «Геомодель»
333	08.07.12	старое тат. кладбище	колодец	-7,9	-56	44°47'6"	33°59'57"	РЦ «Геомодель»
101	08.07.12	Постоялый двор	колодец	-7,9	-58	44°46'41"	34°00'03"	РЦ «Геомодель»
325	26.07.12	Сев.32	колодец	-7,7	-57	44°46'52"	33°59'55"	РЦ «Геомодель»
316	13.07.12	Марлен	колодец	-6,9	-53	44°47'26"	33°59'19"	РЦ «Геомодель»
600	16.07.12	Бодрак у ст.Кугульчик	река	-7,7	-54	44°45'00"	34°03'26"	РЦ «Геомодель»
604а	16.07.12	Бодрак, 50 м от "У шлагбаума" (по течению)	река	-8	-57	44°45'12,3"	34°03'08,6"	РЦ «Геомодель»
602	16.07.12	мчж. Бодрак	река	-4,2	-40	44°45'46,2"	34°01'59,3"	РЦ «Геомодель»
603	16.07.12	Бодрак 3 км по течению от т.602	река	-5,9	-47	44°45'46,2"	34°01'59,1"	РЦ «Геомодель»
616	23.07.12	Бодрак у Эмирова родника	река	-5,5	-45	44°47'01,2"	33°59'34,9"	РЦ «Геомодель»
614пп	10.07.12	подрусл.поток у водопада	река	-7	-53	44°47'50,5"	33°58'58,4"	РЦ «Геомодель»
628	17.07.12	Бодрак, 200 м от р. Альма	река	-7,1	-53	44°49'26,8"	33°56'59,2"	РЦ «Геомодель»
630	17.07.12	Бодрак у р. Альма	река	-7,9	-56	44°49'40,3"	33°56'36,5"	РЦ «Геомодель»
100	03.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-7,5	-40,8	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	03.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-8,2	-46,4	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	04.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-4,9	-20,8	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	08.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-7,3	-54,9	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	08.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	0,8	-15,3	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	09.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-8,3	-58	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	12.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-4,5	-28,9	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	13.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-4,7	-35,1	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	14.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-0,6	-8,2	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	15.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-0,5	-6,3	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	16.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-4,2	-26,9	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	17.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	0,1	-7,1	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	17.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-3,5	-16,9	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	24.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-4,7	-25,6	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	30.06.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	1,1	3,8	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	02.07.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-10,1	-71,1	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	03.07.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-7,2	-45	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
100	04.07.13	д. Трудолюбовка	атм. осадки	-11,4	-79,5	44°47'10,0"	33°59'59,1"	ЛИГФ СПбГУ
616	02.06.13	Бодрак	река	-7,1	-50,9	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	03.06.13	Бодрак	река	-7,3	-51,1	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ

616	04.06.13	Бодрак	река	-7,8	-49,5	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	05.06.13	Бодрак	река	-7,7	-50	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	08.06.13	Бодрак	река	-7,5	-50,4	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	08.06.13	Бодрак	река	-8,1	-55,4	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	09.06.13	Бодрак	река	-5,3	-44	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	11.06.13	Бодрак	река	-7,6	-51,8	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	13.06.13	Бодрак	река	-7,2	-46,9	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	14.06.13	Бодрак	река	-4,2	-35,9	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	16.06.13	Бодрак	река	-7,4	-50,1	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	23.06.13	Бодрак	река	-7	-51	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	29.06.13	Бодрак	река	-7,5	-52,5	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
610	01.07.13	Бодрак у Кермена	река	-7,5	-51,1	44°46'23"	34°00'32"	ЛИГФ СПбГУ
612	01.07.13	Бодрак_Тещин мост	река	-7,2	-51	44°46'50"	33°59'53"	ЛИГФ СПбГУ
616	01.07.13	Бодрак у вдк	река	-7,5	-51,8	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
615	02.07.13	Бодрак_белое обн	река	-7,8	-54,3	44°47'23"	33°59'12"	ЛИГФ СПбГУ
616	03.07.13	Бодрак	река	-8,1	-55,1	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
616	07.07.13	Бодрак	река	-8,1	-54,3	44°47'04"	33°59'31"	ЛИГФ СПбГУ
503	01.07.13	Колхозный	ставок	-9,5	-62,4	44°47'12"	34°00'07"	ЛИГФ СПбГУ
505	01.07.13	Мангуш	ставок	1,4	-12,3	44°46'11"	34°00'34"	ЛИГФ СПбГУ
501	05.07.13	Воронежский	ставок	1,4	-11,5	44°46'32"	33°59'39"	ЛИГФ СПбГУ
318	июл.13	Севастопольская 17	колодец	-9	-60,4	44°47'12"	33°59'35"	ЛИГФ СПбГУ
311	01.07.13	Шевченко 13	колодец	-9,1	-61,2	44°47'21"	33°59'32"	ЛИГФ СПбГУ
303	01.07.13	Кузьмича	колодец	-8,8	-60,4	44°47'13"	33°59'56"	ЛИГФ СПбГУ
331	01.07.13	свиноферма	колодец	-9,1	-61	44°47'15"	34°00'08"	ЛИГФ СПбГУ
103	23.06.13	Кермен	родник	-9,1	-60,9	44°46'23,57"	34°00'40,47"	ЛИГФ СПбГУ
105	23.06.13	Патиль	родник	-9,1	-61,5	44°46'19,00"	33°59'44,49"	ЛИГФ СПбГУ
133	29.06.13	Балта-Чокрак	родник	-9,6	-63,4	44°47'26,65"	33°57'25,99"	ЛИГФ СПбГУ
105	11.07.13	Патиль	родник	-9,4	-62,2	44°46'19,00"	33°59'44,49"	ЛИГФ СПбГУ
103	13.07.13	Кермен (пересохший)	родник	-9,3	-60,5	44°46'23,57"	34°00'40,47"	ЛИГФ СПбГУ
52	16.07.13	гора Агармыш	родник	-10,4	-67,4	45°02'30,37"	35°04'35,90"	ЛИГФ СПбГУ
54	17.07.13	Пания, Большой каньон	родник	-10,4	-66,2	44°31'19,40"	34°00'14,20"	ЛИГФ СПбГУ
70	18.07.13	Гора Опук	родник	-9,8	-63,2	45°01'57,33"	36°13'41,71"	ЛИГФ СПбГУ
73	27.06.13	Ай-Никола, Ялта	родник	-9,2	-55,7	44°27'00,00"	34°07'00,00"	ЛИГФ СПбГУ
45	28.06.13	Родники в Радостном	родник	-10,3	-65,4	44°59'46,27"	34°50'44,42"	ЛИГФ СПбГУ
71	28.06.13	Вриси, южн.склон хребта Эльк-Кая	родник	-10,8	-70	-	-	ЛИГФ СПбГУ
72	28.06.13	Под г. Пахкал-Кая (Сев. Демерджи), перевал Фуна	родник	-10,6	-67,4	-	-	ЛИГФ СПбГУ
75	30.06.13	Под скл. Юж. Демерджи (Джур-Джур - Джурла)	родник	-10,9	-67,8	-	-	ЛИГФ СПбГУ
47	июл.13	Лягушка, Коктебель	родник	-9,5	-60,6	44°57'37,00"	35°12'00,00"	ЛИГФ СПбГУ
48	июл.13	Ниже Лягушки	родник	-9,3	-58,9	44°57'37,00"	35°12'00,00"	ЛИГФ СПбГУ
76	01.07.13	Метеостанция, Ангарский перевал	родник	-11	-68	44°45'18,87"	34°20'26,68"	ЛИГФ СПбГУ

77	02.07.13	У Кутузовского озера, юж.склон Чатырдага	родник	-10,8	-67,4	44°44'16,88"	34°20'06,17"	ЛИГФ СПбГУ
78	03.07.13	Чатырдаг, Грушевая поляна	родник	-11,1	-70,5	44°45'00,61"	34°19'00,73"	ЛИГФ СПбГУ
79	05.07.13	Перевальное, у Красных пещер	родник	-12,4	-85,3	44°51'06,96"	34°20'00,63"	ЛИГФ СПбГУ
81	06.07.13	Монастырь Козьмы и Демьяна	родник	-11,1	-72,9	44°39'54,27"	34°16'13,51"	ЛИГФ СПбГУ
69	09.07.13	Родник Молитва	родник	-9,1	-56,5	44°41'52,70"	33°52'56,80"	ЛИГФ СПбГУ
74	29.06.13	ущ.Хапхал, р.Улу-Узень (над Генеральским)	река	-11,1	-70,2	44°48'544"	34°24'247"	ЛИГФ СПбГУ
46	02.07.13	ущ.Хапхал, р.Улу-Узень, водопад (Генеральское)	река	-11	-69,7	44°48'19"	34°27'34"	ЛИГФ СПбГУ
80	05.07.13	Красные пещеры. Водопад Су-Учхан, Перевальное. р.Краснопещерная	река	-10,1	-65	44°52'083"	34°20'564"	ЛИГФ СПбГУ
55	17.07.13	Большой каньон, посл. точка маршрута	река	-10,2	-65	44°46'379"	34°22'298"	ЛИГФ СПбГУ