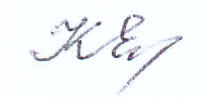


*На правах рукописи*

**КАЮКОВА Елена Павловна**



**ОЦЕНКА ПОДЗЕМНОГО СТОКА  
КАК ЭЛЕМЕНТА ВОДНОГО БАЛАНСА  
ПРИ КОМПЛЕКСНЫХ  
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ  
(СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЕ СКЛОНЫ КРЫМСКИХ ГОР)**

*Специальность 25.00.07 – Гидрогеология*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук**

**Санкт-Петербург - 2018**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

*Научный руководитель:*

доктор геолого-минералогических наук, профессор  
Павлов Александр Николаевич

*Официальные оппоненты:*

Харитоновна Наталья Александровна  
доктор геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра гидрогеологии, профессор

Устюгов Дмитрий Леонидович  
кандидат геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра гидрогеологии и инженерной геологии, доцент, заведующий кафедрой

*Ведущая организация* – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского»

Защита диссертации состоится 25 апреля 2018 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.224.01 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21 линия, д. 2, аудитория 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета или на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 22 февраля 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



КИРЬЯКОВА  
Ирина Геннадьевна

## ОБЩАЯ 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 дисбалансу и 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 в достаточной мере 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.

**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 особенностей химического состава подземных вод и оценки их питьевых качеств.

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 среднесного 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. Выявлены закономерности формирования химического состава подземных вод; выделена водоносная зона вулканогенно-осадочной толщи; 3. Рассчитаны соотношения миграционных форм химических элементов в подземных водах; 4. Выполнена оценка качества вод, используемых в хозяйственно-питьевых целях; 5. Предложены подходы к оценке и картированию подземного стока горных территорий при недостатке материалов наблюдений (которые можно применить в районах с аналогичными природными условиями); 6. На основе гидрохимических данных построено уравнение среднесного водного баланса бассейна р. Бодрак.

**Фактический материал и личный вклад автора.** В основе диссертации - результаты полевых работ (1998-2016 гг.). Теоретический анализ выполнен автором на основе собственного фактического материала, собранного за 19-летний период. Кроме собственных использованы некоторые литературные данные, а также результаты наблюдений метеостан-

ции 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 т.ч. 47 проб атмосферных осадков); около 140 проб воды на стабильные изотопы ( $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ ) и около 50 - 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. Экспедиционные (гидрохимический мониторинг природных вод, динамические, климатические, гидрологические, водно-балансовые исследования; оценка подземного стока); 2. Лабораторные (анализ гидрохимических проб методами титриметрии, гравиметрии, ICP ES, ICP MS; анализ изотопов  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  на масс-спектрометре DELTA<sup>plus</sup> и на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro производства США; анализ на тритий на сцинтилляционном счетчике Quantulus-1220); 3. Теоретические (обработка, систематизация, обобщение литературных материалов и данных метеостанции пос. Почтовый; анализ результатов мониторинга природных вод района, климатических и гидрологических изменений за период 1998-2015 гг.); 4. Расчетные (в том числе моделирование) 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, PHREEQC Interactive 2.15.0, AqQA.

#### **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, комплексным подходом, тщательностью проработки материала. Достоверность подтверждена хорошим совпадением результатов при разных подходах, непротиворечивостью итоговых заключений и выводов, которые опираются на публикации по теме работы.

**Практическая значимость.** 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 оценивать подземный сток рек северо-западных склонов Крымских гор. Сведения о составляющих водного баланса и гидрохимических особенностях природных вод территории помогут максимально оптимизировать водоотбор, прогнозировать изменение количества и качества естественных водных ресурсов, научно обоснованно планировать водохозяйственные мероприятия, что важно в условиях глобального изменения климата и роста населения с учетом трансграничных противоречий между Россией и Украиной в сфере водного хозяйства.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс ИНЗ СПбГУ на Крымской практике и чтении курсов «Методы анализа природных вод», «Экологическая гидрогеология», «Охрана подземных вод». База данных состава используется при обучении студентов-геологов СПбГУ.

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 и полученные материалы использовались в работе Бахчисарайского межрайонного управления водного хозяйства республики Крым.

**Апробация работы.** Основные результаты изложены в докладах: Межд. конф. «Полевые студенческие практики в системе естественного образования вузов России» (Крым, 2002); III Межд. конф. «Экологическая геология и рациональное недропользование» (СПб, 2003). II Межд. конф. «Полевые практики в системе высшего профессионального образования» (Крым, 2007); Межд. симпозиума «Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы» (СПб, 2007); III Межд. конф. «Полевые практики в системе высшего профессионального образования» (Алтай, 2009); Научн. конф. «Комплексные проблемы гидрогеологии» (СПб, 2011); Межд. конф. «Карстовые системы севера» (п. Голубино, 2011); XI Межд. семинара «Геология, геоэкология, эволюционная география» (СПб, 2011); IV Межд. конф. «Полевые практики в системе высшего профессионального образования» (Крым, 2012); II Научн. конф. «Комплексные проблемы гидрогеологии» (СПб, 2013); XII Межд. семинара «Геология, геоэкология, эволюционная география» (СПб, 2014); XIII Межд. семинара «Геология, геоэкология, эволюционная география» (СПб, 2014); XIV Межд. семинара «Геология, геоэкология, эволюционная география» (СПб, 2015); Всеросс. научн. конф. «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.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и приложений; изложена на 189 страницах, содержит 53 рисунка и 40 таблиц; список литературы из 161 наименования. В **первой** главе приведены сведения об изученности и методы исследования; во **второй** главе - общая характеристика района; в **третьей** - геолого-гидрогеологические условия. В **четвертой** главе говорится о формировании химического состава вод; **пятая** посвящена изотопным исследованиям, в **шестой** рассмотрены составляющие водного баланса территории. В **заключении** приведены основные выводы исследования.

**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, 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. Т.А. Барабошкиной, к.г.-м.н. А.А. Потапову, к.г.-м.н. И.Л. Хорхордину, 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 другим 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 центре которого проводился анализ на тритий.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

*1. Установлены основные различия химического состава инфильтрационных вод из различных вмещающих отложений северо-западных склонов Крымских гор. Повышенные концентрации Ва, В, 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.*

Химический состав подземных вод территории формируется под действием природных условий и антропогенных факторов. Преобладающие компоненты обычно  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , однако в водах, связанных с породами области интенсивных тектонических преобразований ( $\text{T}_3\text{-J}_1\text{es}$ ), на первое место в катионном составе выходит Mg. В подземных водах из области замедленного водообмена преобладают ионы  $\text{Na}^+$  и Cl (табл. 1).

Выделена связь соотношений макрокомпонентов и минерализации подземных вод области активного водообмена (рис. 1).

С использованием индексов концентрации определена естественная ассоциация элементов в подземных водах района: Ва (2,0-58,2) – В (1,1-10,3) – Ag (3,2-8,6) – Sr (1,6-8,4) – Sn (3,4-4,9). Особый вклад в ряды геохимических ассоциаций подземных вод вносят: флишевые отложения (Mn – Se); породы из области меланжа (Li – Rb); вулканогенно-осадочная толща (V). В химическом составе грунтовых вод аллювиального горизонта также проявляются влияния подземных вод подстилающих отложений (табл. 2,



рис. 2): ванадий (участок 5), вероятно связан с разгрузкой трещинных вод вулканогенно-осадочной толщи ( $J_{2b}$ ); ряд элементов (B, Li, Rb) в аллювиальных водах участка 3 - с трещинными водами зоны меланжа ( $T_3-J_{1es}$ ).

Барий поступает в подземные воды из отложений, имеющих барий-содержащие минералы. Растворимость барита контролируется концентрацией сульфатов. Источник бора в подземных водах - породы нижнего структурного этажа. Степень его концентрации в водах замедленного водообмена относительно средних содержаний в водах активного водообмена  $\approx 20$ , что должно быть связано со степенью промытости пород инфильтрационными водами. Бор не имеет корреляционной связи с компонентами подземных вод активного водообмена, но жестко коррелирует с Sn, As, Cr, Al в водах из области замедленного водообмена (заявляя о парагенной ассоциации элементов).

**Таблица 1.** Химический состав природных вод бассейна р. Бодрак

Комп-т мг/л мг-экв/л	Область активного водообмена					Замедленный водообмен	Атм. осадки	Зона гипергенеза (СШварцев)
	$T_3-J_1$ tv	$T_3-J_1$ es	$J_{2b}$	$K_1$	$P_2$			
Na <sup>+</sup>	<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	45,5
K <sup>+</sup>	<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 <sup>2+</sup>	<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	43,9
Mg <sup>2+</sup>	<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	18,6
Cl <sup>-</sup>	<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	47,0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<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	75,1
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<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	174,0
NO <sub>3</sub> <sup>-*</sup>	<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	
CO <sub>2</sub> своб. мг/л	2,5	63,8	20,6	34,3	16,3	1,2	3,1**	

Примечание: органические вещества не определялись; \*NO<sub>2</sub><sup>-</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup> определялись в единичных пробах; \*\*CO<sub>2</sub>агрес. в атм.осадках 3,0 мг/л (в подземн. водах CO<sub>2</sub>агрес.= 0)

По данным факторного анализа ведущая роль в формировании ассоциаций химических элементов в подземных водах принадлежит вулканогенно-осадочным и песчано-глинистым породам триаса и юры. Ассоциа-

ция (Sb, As, Se, Co, Mo, Sn, Ag) обязана составу вмещающих отложений (сульфидные конкреции и стяжения широко распространены в известняках мела и палеогена, а также во флише таврической серии, T<sub>3</sub>-J<sub>1</sub>tv).

На основе анализа индексов концентраций и данным факторного анализа выделена ассоциация металлов Zn-Fe-Cu-Pb-Ni связанная с антропогенным загрязнением, что естественно для плотно застроенной территории с животноводческими и приусадебными хозяйствами. Высокие индексы концентрации N (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) указывают на нитратное загрязнение территории, при этом в водоносной зоне вулканогенно-осадочной толщи (J<sub>2</sub>b) отмечаются процессы метаморфизации химического состава воды:

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

На основе коэффициентов водной миграции (K<sub>x</sub>) по методике Перельмана, оценена интенсивность водной миграции отдельных химических элементов, которая либо подчеркивает местные литогеохимические особенности, либо указывает на существующие источники загрязнения природности вод. Высокой интенсивностью владеют N, Cl, S, B, Se (K<sub>x</sub>>10); к сильным мигрантам (K<sub>x</sub>>1) относятся основные катионы (Ca, Na, Mg) и элементы Sr, Sb. Наиболее низкая интенсивность водной миграции свойственна: Al, Th, Fe, Co, Cr, Rb, Ti. В регионе существует повышенное вовлечение Ca, Mg, Ba, B, Sr, Ag (а также Se и As) в миграционные процессы.

При изучении качества питьевых вод были установлены основные формы миграции ведущих элементов в подземных водах района (с помощью моделирования на базе PHREEQC Interactive 2.15.0). Соотношения миграционных форм тяжелых металлов весьма важны при оценке качества питьевых вод (Линник и др., 2007): токсичность определяется не только концентрацией металла в воде, но и состоянием, в котором металл мигрирует (его комплексообразующей способностью). Свободные ионы металлов обладают большей реакционной способностью и потому более токсичны, по сравнению со связанными в комплексы.

Основная тяжесть в весовом составе подземных вод активного водообмена бассейна р. Бодрак приходится на главные анионы - HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (46-55,3%), Cl<sup>-</sup> (4-5,7%), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (3,8-4,6%), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (0,3-13,7%) и катионы - Ca<sup>2+</sup> (3,6-16,8%), Mg<sup>2+</sup> (1,4-8,9%), K<sup>+</sup> (0,4-0,9%), Na<sup>+</sup> (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<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>, на 100% для Na<sup>+</sup> и K<sup>+</sup>. Наибольший вклад в комплексообразование вносят карбонатные и гидрокарбонатные ионы.

Повышенные концентрации ряда металлов (Cd, Mn, Pb) представлены высокотоксичными гидратированными ионами и карбонатными комплексами. Барий  $\approx$  на 90% мигрирует в виде токсичных 2-х валентных катионов. Миграционные формы Al и Fe не токсичны; литий - в виде токсичных катионов ( $\text{Li}^+$ ); нитрат-анион высокотоксичен. Бор, представлен сильнодействующей токсичной ортоборной кислотой  $\text{H}_3\text{BO}_3$ .

Все воды активного водообмена относительно карбонатных минералов близки к равновесию или равновесны: индекс насыщения (si) варьирует в пределах от -1,0 до 0,4. Результаты гидрохимического моделирования позволяют прогнозировать состав вторичных минералов, потенциально способных высаживаться из подземных вод; такого рода данные можно использовать при выборе способа водоподготовки.

***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.***

Изотопный состав природных вод Горного Крыма за период 2006-2013 гг. представлен на графике в координатах  $\delta^{18}\text{O} \div \delta^2\text{H}$  относительно глобальной линии метеорных вод (Craig, 1961) и локальной линии (ЛЛМВ) северного склона Крымских гор (Дублянский, 2012) (рис. 3). Данные выражены в относительных единицах, отражающих отклонение изотопного состава изучаемой воды от международного стандарта v-smow.

Почти все точки, соответствующие подземным водам, располагаются вдоль ЛЛМВ, доказывая свою метеогенную природу. Основная масса данных точек сгущена, что подтверждает их общий источник питания.

Локализация точек источников Горного Крыма отвечает нижней (более изотопно легкой) части семейства точек графика (рис. 3), то есть осадки холодных месяцев играют большую роль в их питании. Источники Горного Крыма, расположенные на больших высотных отметках имеют более легкий изотопный состав (изучено 27 источников).

Подземные воды, формирующие летний меженный сток р.Бодрак, образовались вследствие разгрузки подземных вод, которые, в свою очередь, сформировались за счет весенних осадков. Точки, соответствующие

щие водам р. Бодрак (2012, 2013 гг.), расположились вдоль линий 8 и 6 соответственно (рис. 3), имеющих тангенс угла наклона около 4 (такое отклонение характерно природным водам претерпевшим испарение).

На пересечении ЛЛМВ и линий регрессии получаем предположительный изотопный состав атмосферных осадков, сформировавших межженный сток р.Бодрак ( $\delta^{18}\text{O} = 8,3\text{‰}$ , 2013 г.). Атмосферные осадки области питания (с учетом высотного градиента  $-0,17\text{‰}/100\text{ м}$  (*Дублянский и др., 2012*)) отвечают весенним месяцам (конец марта, апрель). В теплый период года воды р. Бодрак, как и другие природные воды бассейна (в том числе и атмосферные осадки), обогащаются тяжелыми изотопами, а в холодный – обедняются.

Фигуративные точки поверхностных вод ставков (линии 7 и 10) показывают, что их воды подверглись существенному испарению. Анализ отметок области питания, взаимодействия ЛЛМВ и линий регрессий (2012, 2013 гг.) говорит, что ставки обязаны зимне-весенним осадкам.

Летние осадки идут главным образом на испарение, однако длительные дожди интенсивностью около 20 мм могут питать подземные воды (*Дублянский и др., 2012*). Интенсивные осадки (в нашем случае, 6 проб интенсивностью 17 мм) несколько легче непродолжительных дождей и имеют состав на отметках 270 м над ур.м.:  $\delta^{18}\text{O} = -4,2\text{‰}$  и  $\delta^2\text{H} = -30,3\text{‰}$ .

Месячные вариации изотопного состава атмосферных осадков получены расчетом на основе зависимости изотопного состава осадков и температуры воздуха с использованием данных метеостанции п. Почтовый. По данным 14 проб осадков (2013 г.), была выявлена связь температур приземного воздуха в период выпадения осадков с  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в атмосферных осадках:  $\delta^{18}\text{O} = 0,37 \cdot T - 11,5$ ;  $\delta^2\text{H} = 2,38 \cdot T - 76,8$ .

Расчетом определен средний изотопный состав атмосферных осадков в различные месяцы года для района д. Трудолюбовки (alt 270 м) с использованием среднемесячных температур приземного воздуха.

Режим р. Бодрак имеет временной сдвиг около двух месяцев по сравнению с ходом атмосферных осадков (рис. 4). Существует корреляционная зависимость расходов р.Бодрак от ряда источников (рис. 5).

Для расчета высотных градиентов, оценки элементов водного баланса на основе GIS-технологий получены расчетные характеристики р. Бодрак (площадь водосборного бассейна, средняя высота водосбора, средняя отметка продольного профиля русла, средняя мощность зоны дренирования и др.). На рис. 6 представлены водосборные площади бассейна р.Бодрак, на рис. 7 - распределение площади по высотным зонам.

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 I группы ( $h_p < 400$  м).

Метод среднегодового водного баланса в общем виде появился в XIX в. и связан с именами Пенка (1896 г.), А.И. Воейкова (1884 г.), Е.В. Оппокова (1904 г.), в дальнейшем разрабатывался Б.И. Куделиным (1960 г.), М.И. Львовичем (1965) и др.

В основе метода лежит уравнение для многолетнего периода:

$$P = Y + E, \quad (1)$$

где  $P$  — атмосферные осадки;  $Y$  — речной сток;  $E$  — суммарное испарение.

Применительно к бассейну р. Бодрак (границы участка – водораздельные линии, формирующие водосборную площадь р. Бодрак, нижний створ расположен у впадения р. Бодрак в р. Альму):

$$P + Z + T = h + W + E \pm \Delta U. \quad (2)$$

*Приходная часть:*  $P$  — атмосферные осадки, выпадающие на поверхность речного бассейна;  $Z$  — конденсация водяного пара в зоне аэрации;  $T$  — подземный приток.  
*Расходная часть:*  $h$  — поверхностный сток;  $W$  — подземный (устойчивый) сток;  $E$  — суммарное испарение. *Изменение запасов на водосборной площади:*  $\pm \Delta U$ .

**Атмосферные осадки ( $P$ ).** Средний слой атмосферных осадков на водосборе р. Бодрак (в мм слоя) получен как средневзвешенное значение слоев осадков по отдельным высотным зонам (рис.6 и 7):

$$X_{cp} = \sum_{i=1}^n X_i f_i / F, \quad (3)$$

где  $X_i$  — средние осадки отдельной высотной зоны (мм),

$F$  - площадь водосборного бассейна и  $f_i$  - площадь высотной зоны (км<sup>2</sup>).

#### Подземный сток ( $W$ )

*Оценка по дебитам источников.* Режим подземного стока в реки тесно коррелируется с режимом родников зоны свободного водообмена (рис. 5). Естественные ресурсы подземных вод по среднегодовому родниковому стоку характеризуют минимальную величину естественных ресурсов подземных вод. До створа д. Трудолюбовки (водосбор 44 км<sup>2</sup>)

имеется примерно 30 родников, большинство мелкие. Приток подземных вод левобережной части водосборной площади р.Бодрак в 6 раз больше правобережной, за счет развития карстующихся пород (данные 1998-2014 гг.). Метод оценивает лишь часть разгрузки подземных вод. Подземный сток до створа в д. Трудюлюбовке составляет слой 5 мм/год.

*Гидрохимический метод.* Увеличение минерализации воды (или концентрации какого-либо компонента) отвечает уменьшению расходов воды, и, следовательно, увеличению роли подземного питания в межень.

Подземный сток определялся путем решения системы уравнений:

$$Q_p = Q_{\text{подз.}} + Q_{\text{пов.}} \quad (4)$$

$$c_p \cdot Q_p = c_{\text{подз.}} \cdot Q_{\text{подз.}} + c_{\text{пов.}} \cdot Q_{\text{пов.}}; \quad (5)$$

При решении, получим:  $Q_{\text{подз.}} = Q_p (c_p - c_{\text{пов.}}) / (c_{\text{подз.}} - c_{\text{пов.}}).$  (6)

где  $Q_p, Q_{\text{подз.}}, Q_{\text{пов.}}$  - объем речного, подземного и поверхностного стока ( $Q_p$  в створе д. Трудюлюбовки составил 22,5 л/сек., 22.07.2005);

$c_p, c_{\text{подз.}}, c_{\text{пов.}}$  - концентрация какого-либо компонента в *расчетный момент времени* в воде (речной, подземной, поверхностной).

При  $Q_{\text{подз.}} = 0,3 Q_p$ , подземный сток  $\sim 5$  мм/год (для водосборной площади 44 км<sup>2</sup>). Расчет сделан по данным летнего периода 2005 г.

*Метод меженных гидрометрических съемок.* Меженный речной сток выступает как показатель устойчивой части подземного стока. Обычно в летний сезон минимальный сток р. Бодрак 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.).

Для крымских рек характерна прерывистость стока вследствие пересыхания, что вызвано как природными условиями, так и высокой антропогенной нагрузкой в летний период. Пересыхание реки затрудняет оценку подземного стока гидрометрическим методом, тем не менее, можно судить о влиянии на подземный сток температуры и количества осадков.

Подземные воды обеспечивают питание реки, даже в периоды полного отсутствия поверхностного стока, что подтверждается натурными исследованиями отдельных горизонтов и зон (с откачкой и замерами расходов и дебитов). По данным расчета притоков подземных вод в водозабор д. Трудюлюбовки установлена связь водности года и родникового стока. Когда Бодрак пересыхает, значительно снижаются родниковый сток и расход подрусового потока (за счет которых действует водозабор деревни).

*Морфометрический метод.* Изучением зависимости стока от средней высоты горного речного бассейна занимались – Л.А. Владимиров, Б.Д. Зайков, В.К. Давыдов, М.И. Львович, А.И. Зеленой, в Крыму - А.Н. Олиферов.

А.И. Зеленой для рек Приамурья, на основе большого количества данных, выявил зависимость между формой земной поверхности и нормой подземного стока. Используя зависимость Зеленого для территории бассейна р. Бодрак получили слой стока 124 мм/год, т.е. величину для Крыма невероятную, что связано с различием природных условий.

Для выявления местной зависимости между формой поверхности и подземным стоком была найдена связь межженного стока и объемов зон дренирования ( $V_{з.д.}$ ) в зависимости от высотной отметки профиля речного русла ( $h_p$ ) для рек северо-западных склонов Крымских гор. Используются данные справочников по ресурсам поверхностных вод СССР. Средняя отметка профиля русла ( $h_p$ ) определялась как:

$$h_{p,i} = L_i * \cos(i/1000)/2, \quad (7)$$

$L_i$  – длина от пункта наблюдения до дальней точки реки,  $i_i$  – средневзвеш. уклон.

Расположив характеристики рек по возрастанию отметки профиля русла, замечаем, что существует хорошая зависимость межженного стока от объемов зон дренирования для двух групп – с высотной отметкой профиля русла больше 400 м и меньше 400 м (табл. 3; рис. 8).

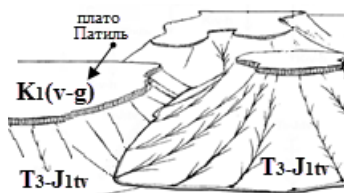
**Таблица 3.** Зависимость межженного стока от морфометрических характеристик для основных рек западного склона Крымских гор

Отметка профиля русла, м	Средняя высота водосбора	Расход в межень, м <sup>3</sup> /сек.	Площадь водосбора км <sup>2</sup>	Объем зоны дренир. V <sub>з.д.</sub>	Расход по Зеленому м <sup>3</sup> /сек.	Q Зелен Qмежень	Поправ. коэфф.	группа
235	680	<b>0,12</b>	493	219,47	4,92	41,0	34	1 группа
319	500	<b>0,10</b>	607	109,89	2,65	26,5		
331	520	<b>0,04</b>	342	64,77	1,65	38,4		
345	580	<b>0,14</b>	525	123,32	2,94	21,0		
359	460	<b>0,01</b>	76	7,66	0,25	40,9		
381	730	<b>0,11</b>	270	94,34	2,31	21,0		
413	520	<b>0,02</b>	300	31,96	0,88	46,2		
459	540	<b>0,12</b>	249	20,06	0,58	4,7	3	2 группа
480	730	<b>0,10</b>	47,6	11,89	0,36	3,7		
503	600	<b>0,08</b>	197	19,05	0,55	7,3		
509	600	<b>0,21</b>	321	29,17	0,81	3,9		
661	800	<b>0,16</b>	110	15,24	0,45	2,8		
675	810	<b>0,10</b>	39,7	5,34	0,18	1,8		
751	840	<b>0,12</b>	44	3,90	0,13	1,1		
862	870	<b>0,01</b>	8,8	0,07	0,00	0,8		
874	910	<b>0,09</b>	83,6	3,02	0,11	1,2		

Для 1 группы рек ( $h_p < 400$  м) подземный сток по зависимости А.И.Зеленого, оказался  $\approx$  в 30 раз выше реального. Для 2 группы рек ( $h_p > 400$  м) – в 3 раза. Разница объясняется тем, что в 1 группу вошли реки (или участки их среднего течения) 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. Применяв зависимость А.И.Зеленого с поправочным коэффициентом, получим модуль подземного стока  $0,01 \text{ м}^3/\text{сек. км}^2$  (4 мм слоя в год). Достоинства проведенных исследований - их сезонность, простота, дешевизна.

Проанализировав результаты разных методик, принимаем подземный сток р.Бодрак равным  $4 \text{ мм/год}$ .

**Конденсация (Z).** Наличие процессов конденсации подтверждается рядом малодобитных, но постоянно действующих источников (даже в засушливые периоды). Для оценки конденсационного стока верхнемеловых и палеогеновых известняков и мергелей Внутренней гряды использованы литературные данные (В.Н.Дублянский, Б.А.Вахрушев).



**Рис. 9.** Столовые горы бассейна р.Бодрак

Оценка конденсационного стока нижнемеловых известняков, бронирующих поверхности столовых гор (более 10 % территории, рис. 9), выполнена с привлечением данных по дебитам источников г. Патиль в меженный период (мониторинг с 1998 г.). Химический состав источников указывает на их генезис в карбонатных отложениях:  $\text{HCO}_3$  88-95 экв.%, Са 83-85 экв.%.

Низкая минерализация (40-50 мг/л) и жесткость около 5 мг-экв/л свидетельствуют, что область формирования стока родников находится близко от области разгрузки. Средний суммарный меженный расход источников г. Патиль около  $40 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Площадь горизонта  $K_1(v-h)$  примерно  $0,35 \text{ км}^2$ , мощность не более 17 м. На высотах 400 м (уровень плоской вершины) выпадает около 700 мм осадков в год. Общая площадь нижнемеловых отложений в бассейне  $\approx 8,5 \text{ км}^2$ . При условии, что процессы конденсации идут со второй половины апреля до первой половины октября, все нижнемеловые отложения бассейна обеспечивают примерно 1,5-2 мм конденсационного стока в год.

Суммарная конденсация за счет карбонатных пород палеогена, верхнего и нижнего мела составляет слой в 7 мм в год.



**Испарение (Е).** Оценка испарения определялась расчетными методами (основанными на расчетах процесса испарения и эмпирических связях с температурой и влажностью воздуха) и привязывалась к средней высоте водосбора 380 м бассейна р. Бодрак. По методам Э.М. Ольдекопа, Л. Тюрка, Р. Шрайберга и Б.В. Полякова вышли несколько заниженные значения испарения в первую очередь потому, что изучаемая территория является горной областью. Расчеты, предложенные Н.С. Лободой и Е.Д. Гопченко, с использованием модели водно-теплового баланса В.С. Мезенцева выглядят наиболее правдивыми (учитывают региональные зависимости). Близкие к ним оказались зависимости П.С. Кузина.

**Поверхностный сток (h).** Данные о среднемноголетнем стоке р. Бодрак, использованные при составлении водного баланса, получены с сайта Республиканского комитета Крыма по водохозяйственному строительству и орошаемому земледелию: объем стока - 3,15 млн.м<sup>3</sup>.

**Водный баланс бассейна р. Бодрак.** Согласно уравнению (3) на инфильтрацию идет не меньше 122 мм слоя (с учетом того, что не известно, сколько мм приходится на притоки подземных вод (табл. 4)).

Подземные притоки оценить не удалось, но по химическим и изотопным данным известно, что такие притоки существуют: во-первых, в верховьях р. Бодрак в химическом составе подземных вод отмечены повышенные содержания Mg<sup>2+</sup> и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; во-вторых, существует аномальная зона с притоками Cl-Na вод (северо-восток д. Трудолюбовки) (о притоках из области замедленного водообмена говорят также данные по тритию); в-третьих, в областях распространения триасово-юрских пород на глубинах более 20-30 м ощущается влияние вод иного химического состава, о чем говорит пестрый химический состав колодезных вод, который хорошо изучен по данным мониторинга, ведущегося с 1998 г.

Привлечем гидрохимические данные к оценке неизвестных составляющих водного баланса, используя хлор-ион (табл. 5 и 6). Примем некоторое допущение, что испарившаяся влага хлор-ион в заметных количествах не содержит (*Коротков, Павлов, 1972*). Далее рассчитаем баланс для Cl<sup>-</sup> (темная строка в табл. 6), затем вычислим подземные притоки в мм слоя ( $175,2/24,0=7$  (мм)). Элементы среднемноголетнего водного баланса представлены в таблице 7.

Устойчивые водные ресурсы бассейна р.Бодрак (W+s) составляют 20% от общего речного стока, что относится ко всем рекам I группы (h<sub>p</sub> < 400 м).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Территория северо-западных склонов Крымских гор отличается высокими скоростями водообмена неглубокозалегающих подземных вод, гидрохимические и динамические особенности которых определяются климатическими условиями и литологическими характеристиками водовмещающих отложений. Выявлены природные геохимические особенности природных вод региона и основные различия инфильтрационных вод, циркулирующих в породах разного вещественного состава; выделены водоносные горизонты и зоны на территории бассейна р. Бодрак.

При изучении составляющих водного баланса бассейна р. Бодрак как аналога рек северо-западных склонов Крымских гор установлено, что сезонная нехватка естественных водных ресурсов для хозяйственно-питьевых нужд является в большинстве случаев следствием нерационального потребления.

Практически все подземные воды в Предгорьях Крыма имеют инфильтрационный генезис. По природе растворителя основными «первоисточниками» воды во всех типах подземных вод являются метеорные.

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.

На глубинах более 20–30 м за счет восходящей фильтрации существуют притоки хлоридно-натриевых солоноватых вод из зоны замедленного водообмена, что отражается на химическом составе вод активного водообмена. Выявлены естественные ассоциации элементов; так повышенные содержания Ba, B, Ag, Sr, Sn - геохимическая особенность территории. Наиболее интенсивно в водах мигрируют N, Cl, S, Se, V. Повышенным вовлечением в миграционные процессы (по сравнению со средними данными) отличаются: Ca, Mg, Ba, B, Sr, Ag (а также Se и As).

Установлена степень равновесия подземных вод с некоторыми карбонатными и сульфатными минералами. Подземные воды из всех вмещающих отложений равновесны или близки к равновесию с кальцитом; относительно доломита имеют неодинаковую степень насыщенности; относительно сидерита, магнезита, стронцианита обычно недонасыщены.

В летний период природные воды северо-западных склонов Крымских гор утяжеляются изотопами  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  за счет процессов испарения и сезонного изменения состава атмосферных осадков. В летнюю межень подземный сток реки Бодрак осуществляется за счет весенних

осадков. Режим реки Бодрак имеет временной сдвиг около двух месяцев по сравнению с ходом осадков.

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. Искусственные водоемы бассейна р.Бодрак почти на 70% имеют подземное питание.

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.

Оценен конденсационный сток нижнемеловых отложений Второй гряды Крымских гор по данным летних меженных мониторинговых наблюдений за дебитами источников столовой горы Патиль.

С привлечением гидрохимических данных построено уравнение среднесуточного водного баланса территории бассейна р. Бодрак.

Выявлен участок устойчивого нитратного загрязнения в зоне экзогенной трещиноватости вулканогенно-осадочной толщи (центр д. Трудолюбовки), где содержания нитратов в 2-4 раза выше ПДК; здесь же отмечены явления антропогенной метаморфизации подземных вод;

Вода централизованного водозабора д. Трудолюбовки соответствует нормам качества согласно СанПиН 1074-01, исключая барий и железо, концентрации, которых могут превышать ПДК. Повышенное содержание бария в подземных водах - гидрохимическая особенность района;

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

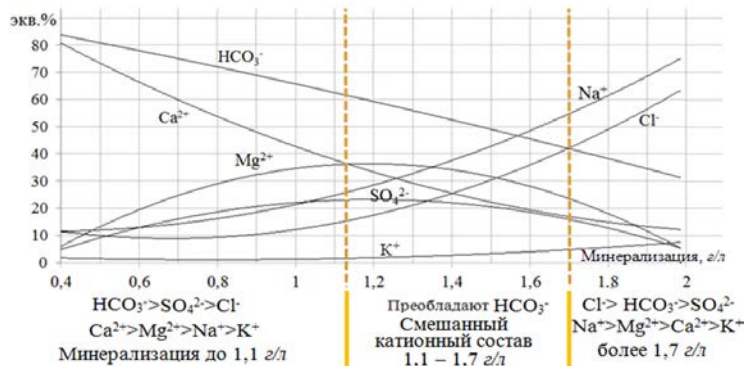
Повышенные концентрации ряда металлов (Cd, Mn, Pb) в составе пресных подземных вод района представлены высокотоксичными свободными ионами и карбонатными комплексами. Барий примерно на 90% мигрирует в виде токсичных катионов  $Ba^{2+}$  (ПДК 0,1 мг/л); миграционные формы Al и Fe не токсичны;  $NO_3^{2-}$  высокотоксичен (ПДК 45 мг/л); бор представлен токсичной кислотой  $H_3BO_3$  (ПДК суммарно 5 мг/л).

За счет местных ресурсов (путем преобразования водного баланса территории) и грамотного хозяйствования можно значительно увеличить количество водных ресурсов для хозяйственно-питьевых нужд и повысить качество жизни населения. Исследования на водосборе р.Бодрак отражают региональные особенности северо-западных склонов гор Крыма.

## НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях перечня ВАК

1. *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: Геология, география. - 2015. - Вып. 2. - С.131-151.
2. *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.
3. *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.
4. *Каюкова Е.П.* Использование изотопных методов для оценки элементов водного баланса // Вестн.С.-Петербур.ун-та. - Сер.7: Геология, география. - 2013. - Вып.4. - С.53-61.
5. *Каюкова Е.П., Котова И.К.* Экологическая оценка химического состава дождевых осадков в пределах Внутренней гряды Крымских гор // Вестн. С.-Петербур. ун-та. - Сер. 7: Геология, география. - 2012. - Вып. 1. - С.39-49.
6. *Каюкова Е.П.* Гидрохимические особенности атмосферных осадков полигона Крымской геологической практики СПбГУ // Вестн. С.-Петербур. ун-та. - Сер. 7: Геология, география. - 2011. - Вып. 2. - С. 26-43.
7. *Каюкова Е.П.* Мезоклимат полигона Крымской геологической практики и современные тенденции его изменения // Вестн. С.-Петербур. ун-та. - Сер. 7: Геология, география. - 2010. - Вып. 4. - С.32-46.
8. *Каюкова Е.П., Чарыкова М.В.* Особенности химического состава подземных и поверхностных вод полигона Крымской учебной практики геологического факультета СПбГУ // Вестн.С.-Петербур.ун-та. - Сер.7: Геология, география. - 2010. - Вып.3. - С. 29-47.
9. *Каюкова Е.П., Юровский Ю.Г.* Водные ресурсы Крыма // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016, № 1, С. 25-32.
10. *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.
11. *Каюкова Е. П., Барабошкина Т. А., Бударина В. А.* Ресурсный потенциал пресных вод Крыма. Статья 2. Водные ресурсы, экология и политика // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2016, № 1. - С. 131–135.



**Рис. 1.** Связь соотношения макрокомпонентов и минерализации в подземных водах бассейна р. Бодрак (условия окислительные)



**Таблица 2.** Геохимические ассоциации химических элементов в водах четвертичного водоносного горизонта

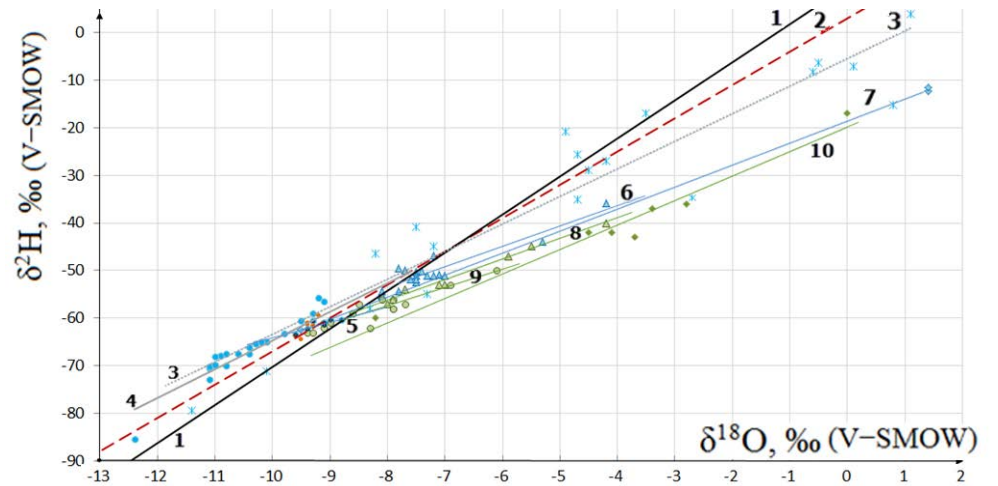
№ на рис.2	Геохимические ассоциации микроэлементов
1	Ag <sub>8,6</sub> – Sn <sub>6,1</sub> – Sr <sub>3,7</sub> – B <sub>3,3</sub> – Ba <sub>2,2</sub>
2	Ag <sub>20</sub> – Ba <sub>20</sub> – N* <sub>9,8</sub> – Zn <sub>7,8</sub> – B <sub>7,7</sub> – Sr <sub>4,3</sub> – Sn <sub>4</sub> – P <sub>3,4</sub>
3	Ag <sub>85</sub> – B <sub>22</sub> – Li <sub>10</sub> – Sn <sub>7,4</sub> – Sr <sub>5,4</sub> – Ba <sub>2,6</sub> – Rb <sub>2,4</sub>
4	Ba <sub>19,5</sub> – Ag <sub>18,9</sub> – Sr <sub>6,5</sub> – Sn <sub>4,8</sub> – V <sub>3,5</sub> – B <sub>2,7</sub> – N* <sub>2,6</sub>
5	N* <sub>46,9</sub> – V <sub>23,4</sub> – Ba <sub>9,7</sub> – Sr <sub>6,9</sub> – Sn <sub>5,1</sub> – Ag <sub>4,1</sub> – Zn <sub>3,8</sub> – B <sub>2,4</sub>
6	N* <sub>29,3</sub> – Ba <sub>8,4</sub> – Sr <sub>6,5</sub> – V <sub>4</sub> – Sn <sub>3,8</sub> – Ag <sub>3,6</sub> – B <sub>3,1</sub> – Zn <sub>2,8</sub>
7	Ag <sub>20,7</sub> – N* <sub>14,7</sub> – Zn <sub>13,4</sub> – Ba <sub>9,4</sub> – Sr <sub>6,6</sub> – P <sub>6</sub> – Cu <sub>4,3</sub> – Sn <sub>4,1</sub> – Pb <sub>3,4</sub> – Ni <sub>2,4</sub>

Примечание: \*азот нитратный

Условные обозначения:

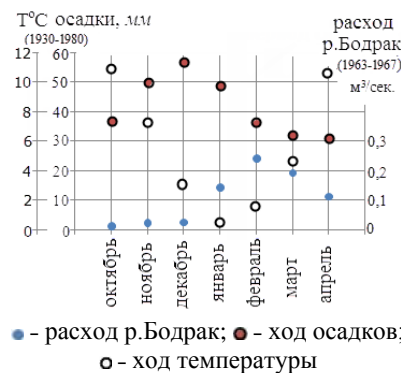
Возраст	Вмещающие отложения
P <sub>2</sub>	органогенные нуммулитовые известняки
K <sub>1</sub>	органогенно-обломочные известняки
J <sub>2</sub> b	туфы, туфопесчаники, аргиллиты и пр. с прослоями лав
T <sub>3</sub> -J <sub>1</sub> es	терригенно-глинистые породы – песчаники, глины, глин. отл.
T <sub>3</sub> -J <sub>1</sub> tv	терригенный флиш (аргиллиты, алевролиты, песчаники)

**Рис. 2.** Участки опробования четвертичного водоносного горизонта



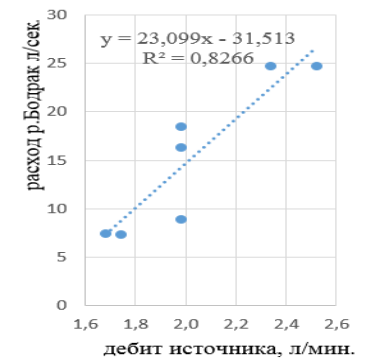
№ линии регрессии	Условные обозначения:	Уравнения регрессии	Кол-во проб	Лаборатория
1	Глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ)	$y = 8x + 10$		
2	Локальная линия (ЛЛМВ)	$y = 7x + 3,2^*$		
3	Летние осадки, 2013, д. Трудолюбовка	$y = 5,78x - 5,65$ ( $R^2 = 0,89$ )	19	ЛИГФ СПбГУ
4	Подземные воды Горного Крыма, 2013 из них источники Горного Крыма, 2013	$y = 6,04x - 4,25$ ( $R^2 = 0,87$ ) $y = 6,77x + 3,41$ ( $R^2 = 0,89$ )	25 21	ЛИГФ СПбГУ 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	Водоёмы (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	Водоёмы (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. 3.** Изотопный состав природных вод бассейна р. Бодрак (2006-2013 гг.)



● - расход р.Бодрак; ● - ход осадков;  
○ - ход температуры

**Рис. 4.** Зависимость расходов р.Бодрак от хода осадков и температуры воздуха



**Рис. 5.** Связь дебита источников и расходов р.Бодрак (2005 г.)

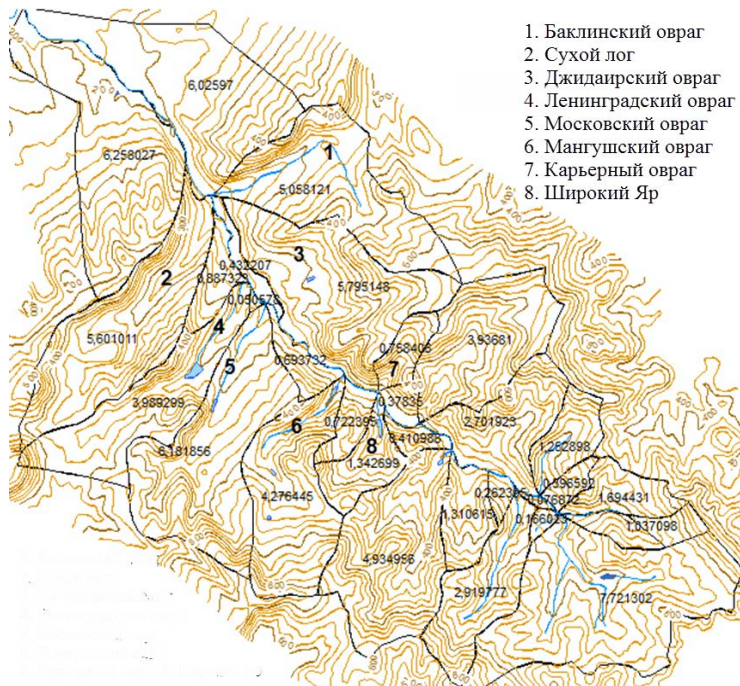


Рис. 6. Водосборные площади бассейна реки Бодрак

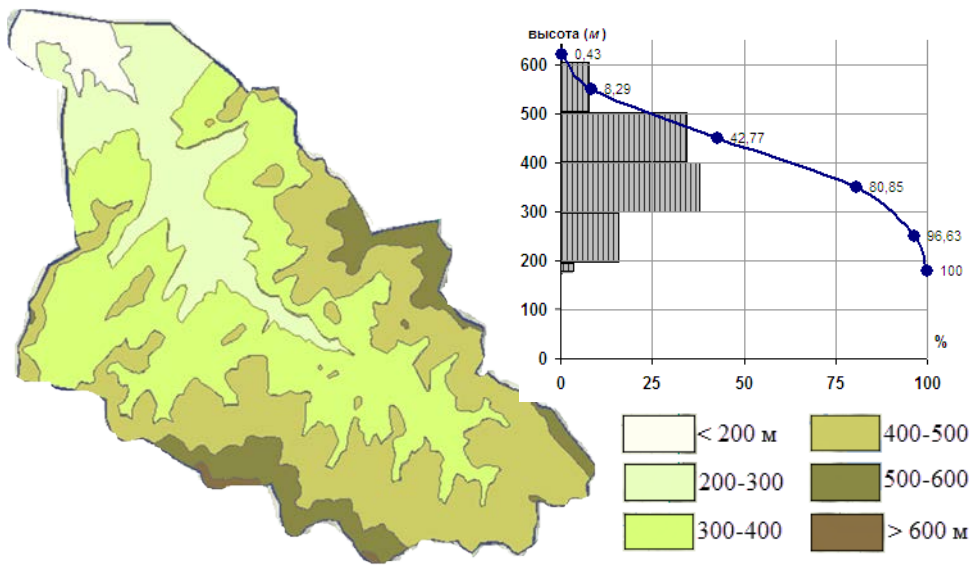


Рис. 7. Распределение площади бассейна р. Бодрак по высотным зонам

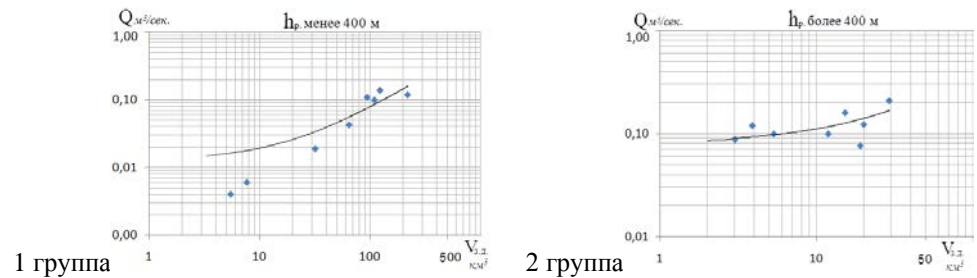


Рис. 8. Связь межennaleго стока и объемов зоны дренирования в зависимости от высотных отметок водосборов для рек северо-западных склонов Крымских гор

Таблица 4. Построение водного баланса территории бассейна р. Бодрак

$$i = (P + Z + T) - (h + W + E) = (685 + 7 + T) - (36 + 4 + 600) = \geq 52 \text{ мм}$$

Таблица 5. Расчет водного баланса бассейна р. Бодрак (данные в мм слоя)

атмосферные осадки	конденсация	подземный приток	поверхн. сток	подземный сток	суммарное испарение	потери на инфильтрацию
P	Z	T	h	W	E	i
692				40		
685	7	?	36	4	530	>122

Таблица 6. Расчет составляющих водного баланса бассейна р. Бодрак (в мм слоя)

	атм. осадки	конденсация	подземный приток	поверхн. сток	подземн. сток	сумм. испарен.	потери на инфл.
	P	Z	T	h	W	E	i
	692				40		
	685	7	7	36	4	530	>122
СИ	41,5		170,7	25,2	4	0	>183
СИ МГ-ЭКВ	0,06		24	0,7	1,0	0*	1,5

\* допускаем, что испаряющаяся вода хлор-ион в заметных количествах не содержит

Таблица 7. Водный баланс бассейна р. Бодрак (в мм слоя)

атм. осадки	конденсация	подземный приток	поверхн. сток	подземн. сток	сумм. испарен.	потери на инфл.
P	Z	T	h	W	E	i
685	7	7	36	4	530	129