

Е. П. Каюкова

ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД ГОРНОГО КРЫМА ПОД ВЛИЯНИЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ*

Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Изучено содержание стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) и трития в подземных водах Горного Крыма. Диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$ в подземных водах меняется от $-10,3$ до $-8,7\%$ с соответствующими значениями $\delta^2\text{H}$ от $-65,2$ до $-59,6\%$. Фигуративные точки располагаются вдоль локальной линии метеорных вод, что означает их метеорное происхождение. Средневзвешенная концентрация стабильных изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ дождевых вод (> 17 мм/сут.) для летнего сезона 2013 г. составила $-7,9$ и $-55,6\%$ соответственно. Формирование подземных вод обусловлено инфильтрацией атмосферных осадков. Дополнительная информация получена на основе содержания трития в природных водах северо-западных склонов Крымских гор. Библиогр. 15 назв. Ил. 7. Табл. 9.

Ключевые слова: Горный Крым, подземные воды, область активного водообмена, атмосферные осадки, стабильные изотопы, тритий.

Е. П. Каюкова

ISOTOPIC COMPOSITION OF THE NATURAL WATERS OF THE CRIMEAN MOUNTAINS UNDER THE INFLUENCE OF NATURAL PROCESSES

Saint-Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

The stable isotopic and tritium content of precipitation and groundwater were studied in the Crimean Mountains. Stable isotopes of water ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) and tritium were used to assess sources of water in the shallow groundwater and surface-water systems, and to better understand groundwater/surface-water interactions. The $\delta^{18}\text{O}$ values of groundwater range from $-10,3$ to $-8,7\%$ with corresponding $\delta^2\text{H}$ values of $-65,2$ to $-59,6\%$. These are mainly scattered along the local meteoric water line, meaning meteoric origin. The weighted average concentration of stable isotopic $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in the rainfall (>17 mm/day) for the summer season of 2013 were approximately $-7,9$ and $-55,6\%$ respectively. Formation of groundwater is caused by the infiltration of precipitation. Additional information has been obtained from tritium data. Refs 15. Figs 7. Tables 9.

Keywords: Crimean Mountains, the zone of active water exchange, underground water, precipitation, stable isotopes, tritium.

Известно, что водные ресурсы Крыма ограничены и полностью не обеспечивают питьевые и хозяйственные потребности населения, при этом атмосферные осадки — основной источник пресных ресурсов Крымского полуострова [1, 2].

В последние десятилетия для решения ряда гидрогеологических, гидрологических и других задач широко используются исследования стабильных изотопов водорода и кислорода. Так, на основе количественных данных $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ исследуются режим и взаимодействие подземных вод с вмещающими породами, определяется генезис природных вод, проводится оценка доли генетической составляющей и др. При изучении темпов водообмена и процессов миграции для датирования природных вод часто используют тритий.

* Публикация подготовлена в рамках поддержанного РГНФ научного проекта № 15-37-10100.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2016

Район исследования

Исследования проводились в Горном Крыму, представленном тремя грядами — Главной (первой), Внутренней (второй) и Внешней (третьей). В соответствии с мобилистской моделью Горный Крым представляет собой складчато-надвиговую область в составе Альпийско-Гималайско-Индонезийского пояса. Главной структурой второго порядка в северной части Горного Крыма В. В. Юдин считает полосу слабодислоцированных толщ мел-неогенового возраста, которую он назвал Куэстовой моноклиной [3]. Куэстовая моноклинал падает на север под углом 5–10° и формирует две прорезанные многочисленными реками асимметричные гряды — Внутреннюю и Внешнюю. Ярко выраженная в рельефе куэста Внутренней гряды бронируется датскими известняками палеоцена и известняками эоцена.

В гидрогеологическом отношении Главная гряда Крымских гор — внешняя область питания артезианских бассейнов равнинного Крыма, Внутренняя и Внешняя гряды служат внутренней областью питания и основной областью транзита поверхностного и подземного стока, формирующегося в пределах Главной гряды. Куэстовая моноклинал по существу является промежуточным звеном между гидрогеологическими структурами Горно-Крымского бассейна пластово-блоковых вод и артезианскими бассейнами Равнинного Крыма.

Основная масса анализов связана с территорией бассейна р. Бодрак, в среднем течении которого располагается учебный геологический полигон Санкт-Петербургского государственного университета, имеющий статус опорного полигона для основных геологических вузов России и ближнего зарубежья (рис. 1). Здесь представлены преимущественно пресные подземные воды, приуроченные к четвертичным отложениям и коре выветривания отдельных пород мезозоя и кайнозоя.

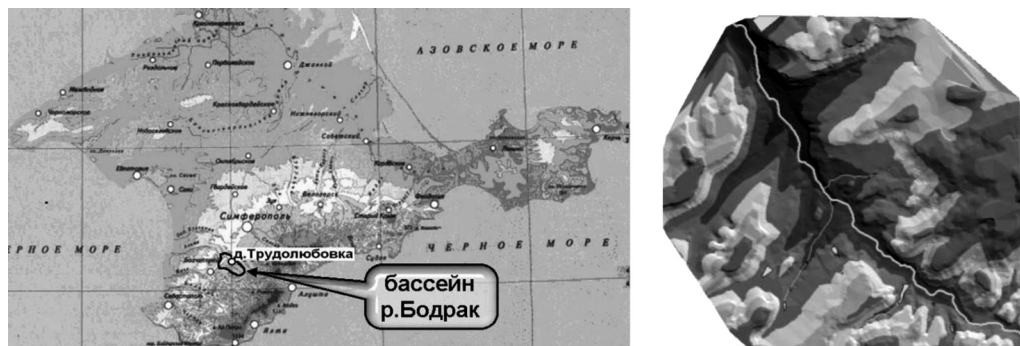


Рис. 1. Бассейн р. Бодрак

Общие сведения

Исследования природных явлений и процессов на основе изучения изотопного состава химических элементов в природных водах опираются на допущение, что исходный изотопный состав любого химического элемента — природная константа, которая в результате природных физико-химических процессов в течение геологической истории Земли претерпевает изменения [4, 5].

Стабильные изотопы водорода и кислорода ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) в атмосферных осадках ведут себя достаточно предсказуемо. Для интерпретации изотопных данных повсеместно используется линия Крейга — глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ) [6]:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10,$$

где δ — отношение стабильных изотопов относительно стандарта, выражается в промилле, 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 $\delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$.

Изотопные данные выражены в относительных единицах:

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

где R — атомные отношения изотопов — водорода ($^2\text{H}/^1\text{H}$) или кислорода ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) в пробе и стандарте.

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 ее испарения и конденсации, 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 [5, 7].

В начале 1950-х годов (до испытаний термоядерных бомб) содержание 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 от 3 до 10 кг [5]. Начатые термоядерные испытания, а также деятельность АЭС и предприятий по переработке ядерного топлива явились мощным источником поступления трития в атмосферу.

В гидрогеологическом цикле источником трития являются верхние слои атмосферы (стратосфера), где происходит его накопление и широтное распределение 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 [5]. Резервуаром стока в системе круговорота трития является океан. С удалением от моря наблюдается континентальный эффект.

В 1958 г. Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирной метеорологической ассоциацией принята программа по измерению изотопного состава воды в окружающей среде. Создана международная наблюдательная сеть стабильных изотопов (^2H , ^{18}O , ^1H , ^{16}O) и радиоактивного изотопа — три-

тия в атмосферных осадках “Global Network Isotopes in Precipitation” (GNIP) [8], 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.

Методы

Первые исследования стабильных изотопов ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) в природных водах Горного Крыма, полученные в период 2006–2011 гг., уже опубликованы [9]. В настоящей статье используются данные 2012–2013 гг. Опробование на тритий проводилось летом 2006, 2009, 2010 гг.

После 2010 г. содержание стабильных изотопов в природных водах измерялось в двух лабораториях: изотопной лаборатории геологического факультета СПбГУ (ЛИГФ СПбГУ) и Ресурсном центре СПбГУ «Геомодель». Пробы анализировались на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro (США). Неопределенность измерений, выполненных на лазерном анализаторе изотопного состава воды Picarro L-2120-i, составляет $\pm 0,1$ и $\pm 1\%$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ соответственно. В качестве стандартов использованы внутрилабораторные образцы, привязанные к стандартам МАГАТЭ V-SMOW (Vienna Standard of the Mean Ocean Water, 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), 1 ТЕ соответствует 0,118 Бк/л [5].

Образцы для изотопного анализа отбирались в небольшие стеклянные бутылочки с водонепроницаемыми завинчивающимися крышками (без какой-либо консервации).

Опробование атмосферных осадков проводилось на территории представительства СПбГУ в д. Трудюлюбовке. Точка сбора осадков — N 44°47'10,0"; E 33°59'59,1"; alt 270 м.

Результаты и обсуждение

Полученные за период исследования данные о содержании 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. 2, табл. 1), здесь же изображена локальная линия метеорных вод северного склона Крымских гор (ЛЛМВ), полученная Ю. В. Дублянским и др. по результатам двухлетних исследований [10].

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

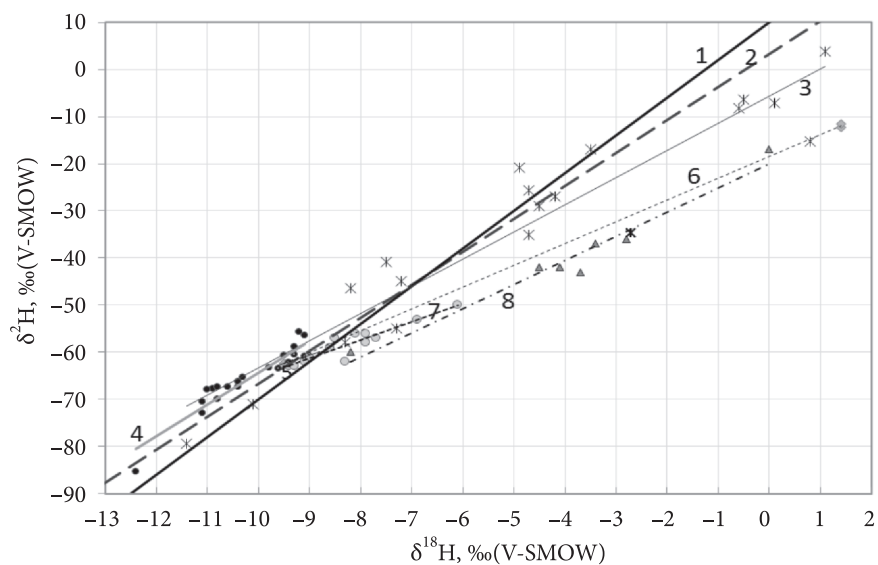


Рис. 2. Изотопный состав природных вод Горного Крыма

Таблица 1. Условные обозначения к рис. 2

Фигуративные точки	№ линии регрессии	Природные воды	Уравнения регрессии	Кол-во проб	Лаборатория
	1	Глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ)	$y = 8x + 10$		
	2	Локальная линия (ЛЛМВ)	$y = 7x + 3,2$ [10]		
✱	3	Летние осадки, 2013 г., д. Трудолюбовка	$y = 5,78x - 5,65$ ($R^2 = 0,89$)	19	ЛИГФ СПбГУ
●	4	Подземные воды Горного Крыма, 2013 г.	$y = 6,04x - 4,25$ ($R^2 = 0,87$)	25	
•		из них источники Горного Крыма, 2013 г.	$y = 6,77x + 3,41$ ($R^2 = 0,89$)	21	
•	5	Подземные воды бассейна р. Бодрак, 2013 г.	$y = 3,485x - 29,33$ ($R^2 = 0,69$)	9	
◆	6	Водоёмы (ставки) бассейна р. Бодрак, 2013 г.	$y = 4,633x - 18,39$ ($R^2 = 1$)	3	
○	7	Подземные воды бассейна р. Бодрак, 2012 г.	$y = 3,878x - 26,44$ ($R^2 = 0,87$)	14	РЦ «Геомодель»
▲	8	Водоёмы (ставки) бассейна р. Бодрак, 2012 г.	$y = 5,129x - 20,01$ ($R^2 = 0,96$)	7	

породами, но эти процессы не повсеместны, так как район расположен в области активного водообмена. Процессы разделения изотопов могут идти в поверхностных и в подземных условиях.

В результате фракционирования фигуративные точки природных вод могут смещаться относительно ЛЛМВ. Расположения точек изотопного состава атмос-

ферных осадков, подземных и поверхностных вод относительно ЛЛМВ в рамках диаграммы $\delta^{18}\text{O}$ — $\delta^2\text{H}$ позволяют сделать некоторые диагностические выводы.

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 (табл. 2). В этом месяце выпало около 40% годовой нормы осадков [11].

Таблица 2. Изотопный состав атмосферных осадков (июнь-июль 2013 г.), д. Трудолюбовка

Изотопы, ‰	Количество проб	Медиана	Средние значения	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
$\delta^{18}\text{O}$	17	-4,7	-5,1	-11,4	-8,1	3,6
$\delta^2\text{H}$	17	-28,9	-34,5	-79,5	-6,3	22,2

Примечание. Анализ проб выполнен в лаборатории ЛИГФ СПбГУ.

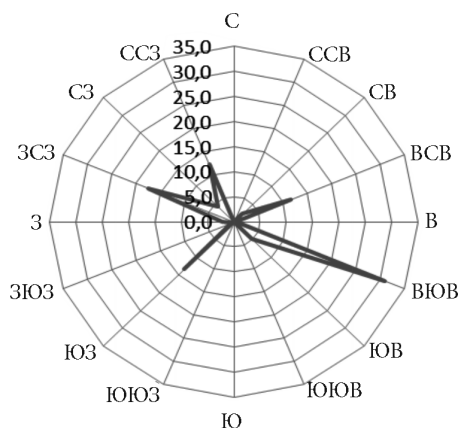


Рис. 3. Количество осадков в зависимости от направлений ветра, июнь 2013, п. Почтовое

В июне 2013 г. преобладали, главным образом, восточные ветры (около 40% случаев). Основное количество выпавших атмосферных осадков было связано с восточными и северо-западными ветрами (примерно 44 и 34% случаев соответственно) (рис. 3).

При исследовании оказалось, что средний изотопный состав осадков, связанный с ветрами западных направлений (от ЮЗ до ССЗ), легче состава осадков, привнесенных ветрами восточных направлений (табл. 3).

Таблица 3. Средний изотопный состав осадков, июнь 2013 г., д. Трудолюбовка

Направления ветра	Кол-во проб	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰
Западные направления (от ЮЗ до ССЗ)	8	-4,81 (от -8,3 до 0,1)	-30,4 (от -58 до -6,3)
Восточные направления (от СВ до ЮВ)	5	-2,1 (от -7,3 до 0,8)	-21 (от -54,9 до -8,2)
Штиль	1	-4,2	-26,9

Примечание. Анализ проб выполнен в лаборатории ЛИГФ СПбГУ.

Средние значения всех имеющихся проб (19) за июнь-июль 2013 г. составили: -4,6 и -32,5‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ соответственно. Из них 6 проб связаны с интенсив-

ными осадками (более 20 мм). По данным В. Н. Дублянского [12], 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. на основании 14 проб дождевых вод получились: $-4,0$ и $-28,4\%$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ соответственно. Средневзвешенные значения 6 проб за июнь 2013 г. с интенсивностью 17 мм/сут. и выше составили: $-4,2\%$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $-30,3\%$ 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 г., имели самый легкий изотопный состав из всех имеющихся в наличии проб: $-11,4$ и $-79,5\%$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ соответственно. Ранее было выявлено, что длительные дожди менее минерализованы, чем кратковременные [13].

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» [10]. По этим данным высотный градиент среднегодовых значений средневзвешенных атмосферных осадков северного склона Крымских гор для $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-0,17\%$ /100 м, для $\delta^2\text{H}$ градиент соответствует $-1,1\%$ /100 м. В табл. 4 представлены средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в атмосферных осадках для станций «Симферополь» и «Чатырдаг» за этот год. Исходя из них среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ для атмосферных осадков д. Трудолюбовки ожидаются: $-7,4$ и $-50,1\%$ соответственно, на метеостанции п. Почтовый (alt 172 м) — около $-7,2$ и $-49,0\%$ соответственно.

Таблица 4. Изотопный состав атмосферных осадков Горного Крыма

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

Известно, что изотопный состав атмосферных осадков контролируется не только ветровым режимом, но и ходом температуры [5], хотя существующая корреляционная связь между ходом температуры воздуха и изотопным составом атмосферных осадков в некоторых случаях может нарушаться, например, для станции «Симферополь» во второй половине 2011 г. вместо однотонных снижений наблюдались высокоамплитудные колебания изотопного состава осадков [10]. Имеющаяся единственная проба зимних осадков, отобранная 10.12.2011 г. в д. Скалистое (alt 270 м), составила $-36,3$ и $-4,49\%$ для $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ соответственно. Она хорошо согласуется с данными Ю. В. Дублянского и др. [10], подтверждая отсутствие чет-

кой корреляции между изотопным составом осадков и среднемесячной температурой воздуха в декабре 2011 г.

Тем не менее попробуем выявить зависимость между температурой приземного воздуха и величинами $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$. Для этого из архива погодных условий [11] получены значения 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. 5), была выявлена связь температур приземного воздуха в период выпадения осадков и содержаний стабильных изотопов в осадках. С привлечением данных о количествах атмосферных осадков, полученных с сайта архива погодных условий [11], посчитали средневзвешенные значения изотопов в осадках на метеостанции п. Почтовый за июнь 2013 г., которые составили: $-4,0$ и $-28,1\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ соответственно (с учетом высотного градиента).

Таблица 5. Зависимость $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ от температуры воздуха, июнь 2013 г. (п. Почтовый)

Дата выпадения осадков	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	Количество атмосферных осадков, мм	Температура °С
3	-7,3	-39,7	2	16,5
3	-8,0	-45,3	29	15,4
4	-4,7	-19,7	8	19,0
8	-7,1	-53,8	20	17,9
8	1,0	-14,2	20	15,5
9	-8,1	-56,9	3	17,2
12	-4,3	-27,8	23	21,1
13	-4,5	-34,0	0,8	24,6
14	-0,4	-7,1	5	17,6
15	-0,3	-5,2	1	18,8
16	-4,0	-25,8	4	18,4
17	0,3	-6,0	17	21,7
17	-3,3	-15,8	17	21,1
30	1,3	4,9	2	27,5

Средние предположительные (расчетные) содержания дейтерия и кислорода-18 для атмосферных осадков д. Трудюлюбовки в различные месяцы года представлены в табл. 6.

Таблица 6. Средние содержания дейтерия и кислорода-18 в атмосферных осадках д. Трудюлюбовки на основе гипотетических уравнений: $\delta^2\text{H} = 2,38\text{T} - 76,8$ и $\delta^{18}\text{O} = 0,37\text{T} - 11,5$

Изотоп, ‰	январь	февр.	март	апр.	май	июнь	июль	август	сент.	окт.	нояб.	дек.	год
$\delta^{18}\text{O}$	-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
$\delta^2\text{H}$	-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

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

В 2013 г. проведено расширенное опробование родников Горного Крыма. Всего было отобрано 25 проб подземных вод, из них за пределами бассейна р. Бодрак — 16 проб из источников. Уравнение регрессии для родниковых вод Горного Крыма имеет вид: $y = 6,8x + 3,4$. Угловой коэффициент весьма близок коэффициенту ЛЛМВ (см. рис. 2). Практически все точки 2013 г. (за исключением источника у Красных пещер) расположились слева от ЛЛМВ.

В табл. 7 представлены данные 2012–2013 гг. опробования на содержание $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в подземных водах Горного Крыма.

Из всех проанализированных проб средний изотопный состав подземных вод бассейна р. Бодрак оказался несколько тяжелее, чем для 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 [5, 9].

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 соленоватых 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 (см. рис. 2, 4). Все точки подземных вод располагаются вдоль локальной линии (ЛЛМВ) и на достаточно близком от нее расстоянии, что является доказательством их метеогенной природы.

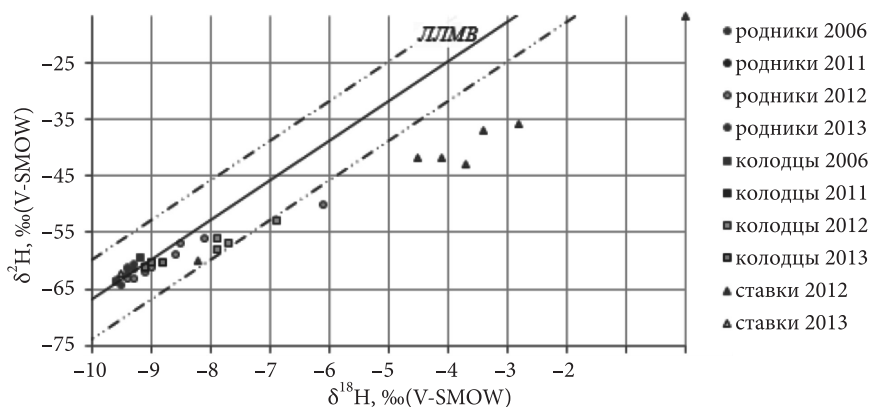


Рис. 4. Изотопный состав подземных и поверхностных вод бассейна р. Бодрак

Таблица 7. Стабильные изотопы в подземных водах Горного Крыма

Дата отбора	Название источника	Привязка		$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	Лаборатория
		N	E			
12.06.2012	Шелудивая	44°45'37,220"	33°59'45,590"	-6,1	-50	РЦ «Геомодель»
21.06.2012	Пагиль	44°46'18,990"	33°59'44,510"	-8,1	-56	
23.06.2012	Успенский монастырь	44°44'39,600"	33°54'37,250"	-9,1	-62	
26.06.2012	Вербочки	44°46'21,750"	33°59'16,160"	-8,3	-62	
08.07.2012	Между Керменами	44°46'26,200"	34°00'41,800"	-8,5	-57	
09.07.2012	Афениз	44°47'22,290"	34°01'48,600"	-9,4	-63	
09.07.2012	Домик лесника	44°47'31,490"	34°00'21,880"	-9	-61	
14.07.2012	Балга-Чокрак, Корабельная куэста	44°47'26,640"	33°57'25,910"	-8,6	-59	
15.07.2012	Лесистая	44°47'09,030"	34°01'01,980"	-9,3	-63	
23.06.2013	Кермен	44°46'23,570"	34°00'40,470"	-9,1	-60,9	
23.06.2013	Пагиль	44°46'19,000"	33°59'44,490"	-9,1	-61,5	
29.06.2013	Балга-Чокрак, Корабельная куэста	44°47'26,650"	33°57'25,990"	-9,6	-63,4	
11.07.2013	Пагиль	44°46'19,000"	33°59'44,490"	-9,4	-62,2	
13.07.2013	Между Керменами (пересохший)	44°46'23,570"	34°00'40,470"	-9,3	-60,5	
16.07.2013	Агармыш	45°02'30,370"	35°04'35,900"	-10,4	-67,4	
17.07.2013	Пания, Большой каньон	44°31'19,400"	34°00'14,200"	-10,4	-66,2	
18.07.2013	Опук	45°01'57,330"	36°13'41,710"	-9,8	-63,2	
27.06.2013	Св. источник под г. Ай-Никола, Ялга, Н. Ореанда-Гаспра	44°27'00,000"	34°07'00,000"	-9,2	-55,7	
28.06.2013	Радостное	44°59'46,270"	34°50'44,420"	-10,3	-65,4	
28.06.2013	Вриси, Ангарский перевал, юж. склон хребта Эльк-Кая	—	—	-10,8	-70	
28.06.2013	Под г. Пахкал-Кая (С. Демерджи), перевал Фуна	—	—	-10,6	-67,4	
30.06.2013	Под склоном Ю. Демерджи (от Джур-Джур к Джурле)	—	—	-10,9	-67,8	
Июль 2013	Коктебель, родник Лягушка	44°57'37,000"	35°12'00,000"	-9,5	-60,6	
Июль 2013	Ниже Лягушки	44°57'37,000"	35°12'00,000"	-9,3	-58,9	
01.07.2013	Метеостанция, Ангарский перевал	44°45'18,870"	34°20'26,680"	-11	-68	
02.07.2013	У Кутузовского озера, южный макросклон Чагырдага	44°44'16,880"	34°20'06,170"	-10,8	-67,4	
03.07.2013	Чагырдаг; Грушевая поляна	44°45'00,610"	34°19'00,730"	-11,1	-70,5	
06.07.2013	Св. источник. Монастырь Козьмы и Демиана	44°39'54,270"	34°16'13,510"	-11,1	-72,9	
09.07.2013	Родник Молитва	44°41'52,700"	33°52'56,800"	-9,1	-56,5	
05.07.2013	Перевальное, у Красных пещер	44°51'06,960"	34°20'00,630"	-12,4	-85,3	

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 4,6 (2013) и 5,1 (2012).

Изменения изотопного состава природных вод под воздействием процессов испарения фиксируются снижением углового коэффициента (тангенса угла наклона) линий регрессии до 4–6 [5, 14]. 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.

Средние концентрации стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) подземных вод бассейна р. Бодрак в летний период меньше, чем среднее содержание данных изотопов в летних атмосферных осадках (табл. 8), что связано с формированием подземных вод за счет более легких зимне-весенних осадков, летние же осадки идут, главным образом, на испарение.

Таблица 8. 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	Средние значения, ‰	
						$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
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/сут, д. Трудолюбовка	2013, июнь	6	-4,2	-30,3	ЛИГФ СПбГУ	-7,9	-55,6
Среднегодовые осадки, д. Трудолюбовка	средние 2010–2011	расчет по литературным данным [10]				-7,4	-50,1

Тритий в природных водах северо-западного склона Крымских гор

Средняя многолетняя концентрация трития в атмосферных осадках для региона Западной Европы составляет 3,6 Бк/л (30,5 ТЕ), для Украины — 3,3 Бк/л (28,0 ТЕ) [15]. На территории Украины, по данным В. А. Дячук [15], в 1970-х годах после прекращения испытаний водородных бомб концентрации трития превышали современные в 5–10 раз, в конце XX в. содержание трития в осадках становится низким,

близким к глобальному фоновому. Наиболее высокие концентрации фонового трития зафиксированы в 1987–1988 гг., как следствие Чернобыльской катастрофы.

В грунтовых водах бассейна р. Бодрак ожидалось содержание трития, близкое 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) [8], его содержание во всех природных водах летом 2010 г. было выше, чем летом 2009 и 2006 гг., что, вероятно, связано с конкретными естественными условиями.

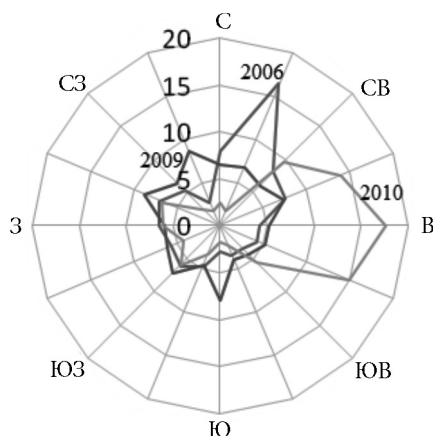


Рис. 5. Розы ветров (июнь-июль) метеостанция пос. Почтовый

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 (рис. 5).

Могут ли неблагоприятные метеословия спровоцировать ветровой перенос радиоактивных веществ с более загрязненных территорий? В принципе — да, к тому же ветры северных, северо-восточных и восточных румбов несут влияние континента и, значит, атмосферная влага не разбавлена низкоактивной океанической водой.

Летом 2006 и 2009 гг. было собрано лишь по одной пробе атмосферных осадков, которые содержали — 18,5 и 6,3 ТЕ трития соответственно, в 2010 г. собрано 7 проб осадков с концентрациями от 27,3 до 47,2 ТЕ.

Поскольку мы имеем явный недостаток данных, воспользуемся свободными материалами с сайта GNIP [8]. По данным ряда станций можно проследить, как менялись концентрации трития в июле от года к году (рис. 6). Данные по осадкам д. Трудолюбовки за 2006 и 2009 гг. вполне укладываются в общую картину, данные 2010 г. — выпадают (возможно, повышенные относительно фоновых значения трития в метеорных водах имеют техногенное происхождение).

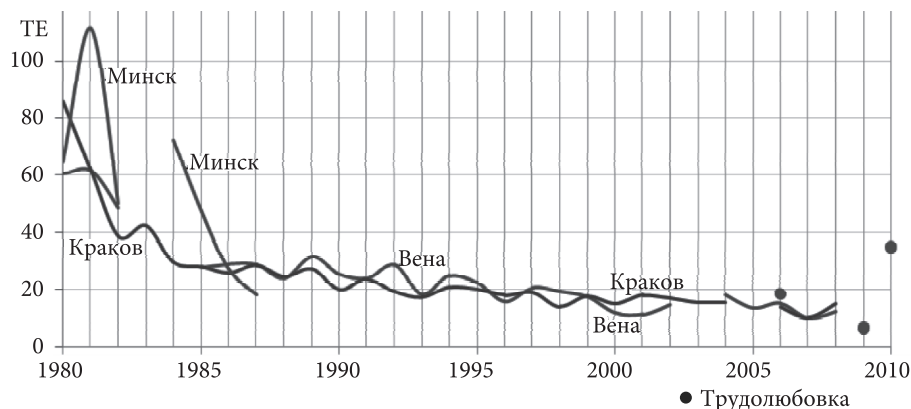


Рис. 6. Тритий в атмосферных осадках (июль)

В 2009 г. во всех природных водах района содержание трития находилось на уровне естественных значений. Тогда на тритий были проанализированы все основные реки северо-западного склона Крымских гор — Альма, Булганак, Бельбек, Кача, Бодрак (всего 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) (табл. 9). Содержание трития в водах р. Бодрак менялось от 4,2 до 8,1 ТЕ (3 пробы).

Таблица 9. Содержания трития в природных водах северо-западного склона Крымских гор

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

Одна проба р. Бодрак была отобрана в марте 2010 г. — 17,9 ТЕ (причем тогда выпала почти двойная норма осадков, а, значит, в составе поверхностного стока р. Бодрак был большой процент атмосферных осадков). Согласно графику сезонных колебаний, построенному по данным из базы GNIP для станций, близких в высотном-широтном отношении изучаемому району (рис. 7), более низкие концентрации отвечают зимним месяцам; из чего следует, что меженный сток р. Бодрак в июне-июле осуществлялся за счет зимних осадков.

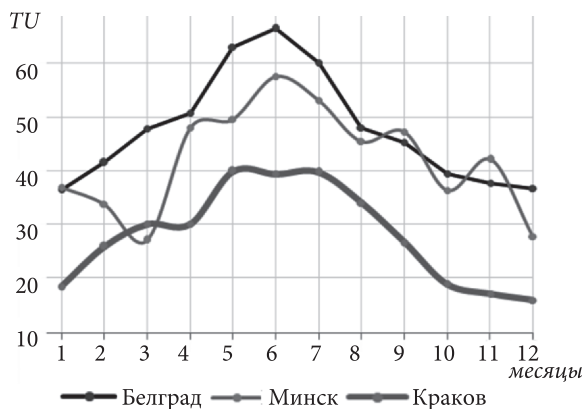


Рис. 7. Тритий в атмосферных осадках на станциях из базы GNIP

Минимальные концентрации трития (ниже предела обнаружения) были определены для колодца по Севастопольской ул., 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). Воды, циркулирующие в зоне замедленного водообмена, могут быть старше времени ядерной эпохи.

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.

Заключение

Подземные воды в Предгорьях Крыма имеют метеогенную природу и формируются главным образом за счет более легких зимне-весенних атмосферных осадков. Территория крымского Предгорья характеризуется высокими скоростями водообмена неглубокозалегающих подземных вод. Данные по тритию подтвердили, что на глубинах более 20–30 м существуют притоки подземных вод из зоны замедленного водообмена. Изотопный состав поверхностных вод формируется под воздействием процессов испарения. Длительные затяжные дожди имеют более легкий изотопный состав, чем ливни и кратковременные дожди. Зависимость изотопного состава атмосферных осадков от приземной температуры воздуха для предгорий Крыма имеет вид: $\delta^2\text{H} = 2,38\text{T} - 76,8$ и $\delta^{18}\text{O} = 0,37\text{T} - 11,5$. Летние атмосферные осадки, идущие на питание подземных вод (т. е. осадки с интенсивностью более 17 мм/сут.), имеют в среднем следующий изотопный состав: $\delta^{18}\text{O} = -4,2\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -30,3\text{‰}$ (по средневзвешенным значениям). Средний изотопный состав $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в атмосферных осадках, связанный с ветрами западных направлений (от ЮЗ до ССЗ), легче состава осадков, привнесенных ветрами восточных направлений. Несколько повышенные уровни ^3H отмечаются при ветровом переносе с северо-востока и востока.

* * *

Автор благодарит сотрудников ЛИГФ СПбГУ — Г. М. Ельцову и Э. М. Прасолова, сотрудников Ресурсного центра «Геомодель» — И. В. Токарева и И. В. Авраменко, при участии которых выполнено большое количество дорогостоящих исследований на стабильные изотопы.

Автор выражает благодарность Е. М. Нестерову — заведующему кафедрой геологии и геоэкологии РГПУ им. Герцена, в Междисциплинарном ресурсном центре коллективного пользования которого проводился анализ водных проб на содержание трития, и М. А. Кульковой за проведение аналитических работ, а также студентке Л. Газизовой, которая осуществляла пробоподготовку на тритий.

Автор благодарит сотрудника Никитского ботанического сада В. П. Исикова, оказавшего неоценимый вклад при опробовании.

Литература

1. Каюкова Е. П., Юровский Ю. Г. Водные ресурсы Крыма // Геоэкология. 2016. № 1. С. 25–32.
2. Каюкова Е. П., Барабошкина Т. А., Косинова И. И. Ресурсный потенциал пресных вод Крыма. Ст. 1 // Вестн. Воронежского ун-та. Серия: Геология. 2014. № 4. С. 101–106.
3. Юдин В. В. Геодинамика Крыма. Симферополь: ДИАЙПИ, 2011. 336 с.
4. Ранкама К. Изотопы в геологии. М.: ИЛ, 1956, 456 с.
5. Ферронский В. И., Поляков В. А. Изотопы гидросферы Земли. М., 2009. 632 с.
6. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science, 1961. N 133. P. 1702–1703.

7. Шварцев С. Л. Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 423 с.
 8. Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) // International Atomic Energy Agency. URL: http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html (дата обращения: 10.07.2011).
 9. Каюкова Е. П. Использование изотопных методов для оценки элементов водного баланса // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7: Геология, география. 2013. Вып. 4. С. 53–61.
 10. Дублянский Ю. В., Климчук А. Б., Амеличев Г. Н., Токарев С. В., Шпётль К. Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор // Спелеология и карстология. 2012. № 9. С. 14–21.
 11. Архив погодных условий. URL: <http://rp5.ru>; <http://meteo.infospace.ru> (дата обращения: 3.12.2010).
 12. Дублянский В. Н. Режим влажности почвогрунта Ай-Петринского горного массива и его гидрогеологическое значение // Почвоведение. 1967. Вып. 12. С. 91–97.
 13. Каюкова Е. П. Гидрохимические особенности атмосферных осадков полигона Крымской геологической практики СПбГУ // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2011. Вып. 2. С. 26–43.
 14. Дубинчук В. Т., Поляков В. А., Корниенко Н. Д. Ядерно-геофизические методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1988. 223 с.
 15. Дячук В. А., Баитанник М. П., Харченко Г. П. Тритий в атмосферных опадах в Україні // Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту (УкрНДГМІ). 2004. Вип. 253. С. 51–58.
- Для цитирования:** Каюкова Е. П. Формирование изотопного состава природных вод Горного Крыма под влиянием естественных процессов // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2016. Вып. 2. С. 11–26. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.202

References

1. Kayukova E. P., Yurovsky Y. G. Vodnye resursy Kryma [Water resources of the Crimea]. *Geoecologiya [Geoecology]*, 2016, no. 1, pp. 25–32. (In Russian).
2. Kayukova E. P., Baraboshkina T. A. and Kosinova I. I. Resursnyi potentsial presnykh vod Kryma [The resource potential of fresh waters of the Crimea]. *Proceedings of Voronezh State University, Ser. Geology*, 2014, no. 4, pp. 104–109. (In Russian).
3. Yudin V. V. *Geodinamika Kryma [Geodynamics of the Crimea]*. Simferopol, DIAPI Publ., 2011. 336 p. (In Russian).
4. Rankama K. *Isotope Geology*. 2nd ed. Leningrad, Pergamon Press, 1954, 535 p. (In Russian)
5. Ferronsky V. I., Polyakov V. A. *Izotopy gidrosfery Zemli [Isotopy of the Earth hydrosphere]*. Moscow, 2009. 632 p. (In Russian).
6. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, no. 133, pp. 1702–1703.
7. Shvartsev S. L. *Obshchaya gidrogeologiya [The general hydrogeology]*. Moscow, Nedra Publ., 1996. 423 p. (In Russian).
8. *Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP)*. International Atomic Energy Agency. Available at: http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html (accessed: 10.07.2011).
9. Kayukova E. P. Ispol'zovanie izotopnykh metodov dlya otsenki elementov vodnogo balansa [The using of stable isotopes for an estimation of elements of water balance]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2013, issue 4, pp. 53–61. (In Russian).
10. Dublyansky Y. V., Klimchouk A. B., Amelichev G. N., Tokarev S. V., Spötl C. Izotopnyi sostav atmosferykh osadkov i karstovykh istochnikov severo-zapadnogo sklona Krymskikh gor [Isotopic composition of atmospheric precipitation and karstic springs of the north-west slope of the Crimean Mountains]. *Speleologiya i karstologiya [Speleology and karstology]*. 2012, no. 9, pp. 14–21. (In Russian).
11. *Arkhiv pogodnykh uslovii [Weather archive]*. Available at: <http://rp5.ru>; <http://meteo.infospace.ru> (accessed: 03.12.2010). (In Russian)
12. Dublyanskii V. N. Rezhim vlazhnosti pochvogrunta Ai-Petrinskogo gornogo massiva i ego gidrogeologicheskoe znachenie [The moisture regime of the soil of the Ai-Petri massif and its hydrogeological value]. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]*, 1967, issue 12, pp. 91–97. (In Russian).
13. Kayukova E. P. Gidrokhimicheskie osobennosti atmosferykh osadkov poligona Krymskoi geologicheskoi praktiki SPbGU [Features of the chemical composition of precipitation of the Crimean training site of SPSU]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2011, issue 2, pp. 26–43. (In Russian).

14. Dubinchuk V.T., Polyakov V.A., Kornienko N.D. *Yaderno-geofizicheskie metody v gidrogeologii i inzhenernoi geologii* [The nuclear-geophysical methods in hydrology and engineering geology]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 223 p. (In Russian).

15. Dyachuk V.A., Bashtannik M.P., Kharchenko G.P. Tritii v atmosfernih opadakh v Ukraïni [Tritium in atmospheric precipitation in Ukraine]. *Proceedings of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute (UHMI)*, 2004, issue 253, pp. 51–58. (in Ukrainian).

For citation: Kayukova E. P. Isotopic composition of the natural waters of the Crimean Mountains under the influence of natural processes. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2016, issue 2, pp. 11–26. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.202

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2016 г.

Контактная информация

Каюкова Елена Павловна — старший преподаватель; epkayu@gmail.com

Kayukova Elena P. — Senior Lecturer; epkayu@gmail.com