

*Е. П. Каюкова*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА

Работа посвящена изучению генетических составляющих элементов водного баланса бассейна р. Бодрак (АР Крым, Украина). Река Бодрак относится к категории малых рек и является левым притоком р. Альмы. Бассейн р. Бодрак располагается на территории Второй (Внутренней) гряды Крымских гор и Южного эрозионно-денудационного межгрядового понижения. Истоки р. Бодрак и верхние притоки формируются в областях распространения сланцев таврической серии на юго-западных склонах хребта Азарпсырт (абс. отм. над ур. м. 560 м) и северных склонах г. Вольская (абс. отм. над ур. м. 486 м), которые фактически являются водоразделами рек Альма, Марта и Бодрак. Рельеф здесь холмистый, эрозионно-расчлененный с многочисленными балками и оврагами (со следами временных водотоков), преобладают узкие водоразделы.

### Общие сведения

Под воздействием круговорота воды все воды гидросферы на суше возобновляются. Однако, если вода используется в объемах выше возобновляемых, источники водных ресурсов истощаются. При изучении условий формирования водных ресурсов, при определении темпов водообмена часто используют изотопные методы.

Между содержанием дейтерия и кислорода-18 в атмосферных осадках существует тесная корреляционная связь [1], которая описывается уравнением (за исключением аридных областей):  $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$  (SMOW). Закономерное распределение изотопного состава осадков в координатах  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$  называют глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ) или линией Крейга [1, 2, 3].

На различных этапах кругооборота воды происходят определенные изменения, связанные с тем, что при испарении и конденсации содержания стабильных изотопов кислорода и водорода несколько меняются. Измеряя эти концентрации, можно отслеживать перемещение воды, получая информацию о длительности циркуляции воды в различных оболочках планеты. Существует взаимосвязь изотопного состава атмосферных осадков с такими параметрами, как широта, долгота, удаленность от побережья, высота над уровнем моря (соотношения изотопов водорода и кислорода в метеорных водах уменьшаются с повышением широты и абсолютных отметок местности). В горных районах с использованием стабильных изотопов оценивают высотные отметки областей питания (рис. 1) и сезон пополнения запасов подземных вод. Расположение  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  относительно глобальной линии метеорных вод широко применяют при интерпретации изотопных данных [3, 4].

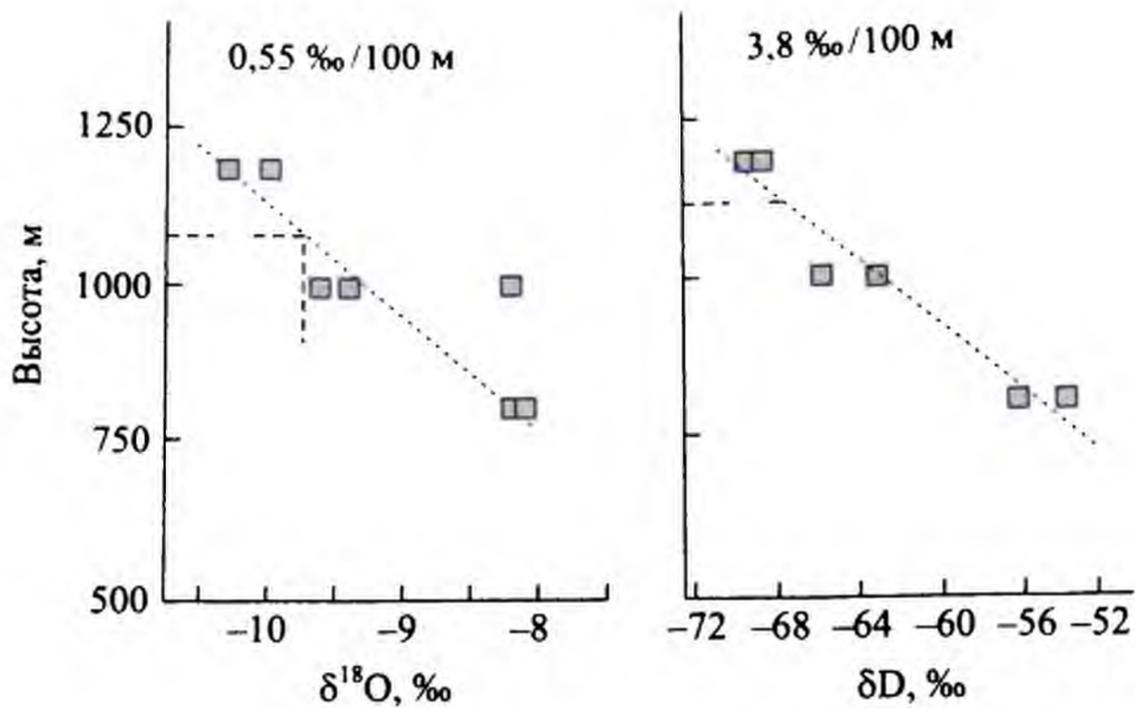


Рис. 1. Изотопный высотный эффект в дождевых осадках Гималаев [4].

В 1958 г. Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирной метеорологической ассоциацией принята совместная Международная программа по измерению изотопного состава воды в окружающей среде. Создана международная наблюдательная сеть по измерению распространённости стабильных изотопов ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^1\text{H}$ ,  $^{16}\text{O}$ ) и радиоактивного изотопа трития в атмосферных осадках. В свободном доступе на сайте Международного агентства по атомной энергии «Global Network Isotopes in Precipitation» (GNIP) [5] размещены сведения об изотопном составе атмосферных осадков из различных уголков земного шара (всего 940 станций).

### Район исследования

Исследования проводились в бассейне р. Бодрак, который располагается в Восточной части Бахчисарайского района АР Крым в предгорье Крымских гор (рис. 2). Предгорья Крымских гор (Вторая и Третья гряды) служат основной областью транзита поверхностного и подземного стока, формирующегося в пределах Главной гряды, и являются промежуточным звеном между гидрогеологическими структурами



Рис. 2. Бассейн р. Бодрак на карте Крыма (а). Расположение точек опробования (б).

Горного Крыма и артезианскими бассейнами Равнинного Крыма. По условиям формирования ресурсов подземных вод это область активного водообмена, где развиты преимущественно пресные подземные воды, приуроченные к четвертичным отложениям и коре выветривания отдельных пород мезозоя и кайнозоя.

В среднем течении р. Бодрак находится учебный геологический полигон Санкт-Петербургского государственного университета, который приобрел статус опорного для основных геологических вузов России и ближнего зарубежья. В д. Трудолюбовке располагается база Крымской практики и Представительство СПбГУ в Крыму (см. рис. 2).

### Методы исследования

Начиная с 2006 г. несколько раз проводились опробования с последующим измерением стабильных изотопов (водорода и кислорода) в подземных и поверхностных водах полигона СПбГУ и в местных атмосферных осадках. Для определения изотопного состава водорода и кислорода в июле 2006 г. было отобрано 9 проб: 6 проб подземных вод на территории бассейна р. Бодрак (в пределах полигона СПбГУ), 1 проба из р. Бодрак в среднем течении и 1 проба атмосферных осадков на территории Представительства СПбГУ в Крыму (д. Трудолюбовка). В июле 2009 г. была отобрана 1 проба атмосферных осадков на территории Представительства СПбГУ, в июне 2011 г. — 1 проба атмосферных осадков, в декабре 2011 г. — 1 проба атмосферных осадков и 1 проба из р. Бодрак. Всего проанализировано 12 водных проб за весь период исследования.

Изотопные измерения проводились в разных лабораториях: проба из р. Бодрак в 2006 г. анализировалась в лаборатории ВСЕГИНГЕО, остальные пробы 2006 г. — в лаборатории ВСЕГЕИ; аналитические работы проводились на масс-спектрометре DELTA<sup>plus</sup>. Прибор DELTA<sup>plus</sup> с 1996 г. является стандартом в масс-спектрометрии стабильных изотопов благодаря своей чувствительности и точности; погрешности определения  $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  —  $\pm 1,5\text{‰}$  и  $\pm 0,2\text{‰}$  соответственно. Пробы 2011 г. анализировались в лаборатории СПбГУ на измерителе изотопного состава водорода и кислорода в воде Picarro.

Изотопные данные выражены в относительных единицах:

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

где  $R$  — атомные отношения изотопов водорода ( $^2\text{H}/^1\text{H}$ ) или кислорода ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) в пробе (пр) и стандарте (ст),  $X$  — изотоп. Величина  $\delta$  показывает, насколько проба обеднена ( $\delta < 0$ ) или обогащена ( $\delta > 0$ ) тяжелым изотопом относительно стандарта ( $\delta = 0$ ). В качестве эталона используется стандарт средней океанической воды — V-SMOW (Vienna Standard of the Mean Ocean Water), для которого по определению  $\delta^2\text{H} = 0\text{‰}$  и  $\delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$  (‰ — промилле, тысячная доля числа).

### Региональные сведения

Первое представление об изотопном составе атмосферных осадков полуострова Крым получили из базы данных глобальной сети изотопов в атмосферных осадках (GNIP), находящейся в свободном доступе на сайте МАГАТЭ [5]. В табл. 1 показаны

Таблица 1. Сравнительные данные д. Трудолюбовки (координаты, высотные отметки, длительность наблюдения) и отдельных станций из базы GNIP [5]

Номер GNIP	Станция	N	E	Alt (м)	Период опробования
	<b>Трудолюбовка (Украина)</b>	<b>44°47'10"</b>	<b>33°59'59"</b>	<b>270</b>	<b>2006–2012</b>
1103500	Вена (Австрия)	48°15'00"	16°22'12"	203	1960–2008
1327401	Белград(Сербия)	44°28'12"	20°19'12"	243	1976–2004
3383700	Одесса (Украина)	46°28'48"	30°37'48"	64	1969–1990
3473100	Ростов-на-Дону (Россия)	47°15'00"	39°49'12"	77	1970–1990
3748400	Батуми (Грузия)	41°39'0"	41°38'0"	6	1980–1990
1702600	Синоп (Турция)	42°1'30"	35°9'30"	32	1966–2009

станции из базы GNIP, наиболее близкие исследуемому району (по широте, долготе и высоте над уровнем моря) и ближайшие станции (рис. 3). Как правило, наблюдения в выбранных станциях выполнялись не в полном объеме. Из них станция в Вене (N 48°15'00", E 16°22'12", alt 203 м) имеет наиболее длинный и представительный ряд наблюдений и близка по высотным отметкам к району исследования.



Рис. 3. Отдельные окружающие Крым станции из глобальной сети GNIP [5].

На рис. 4 показаны средние годовые содержания водорода и кислорода в атмосферных осадках на станциях, окружающих Крымский полуостров, согласно которым среднегодовые осадки над Крымским полуостровом ожидаются следующего состава:  $\delta^2\text{H} = -70 \div -60$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -10 \div -8$ .

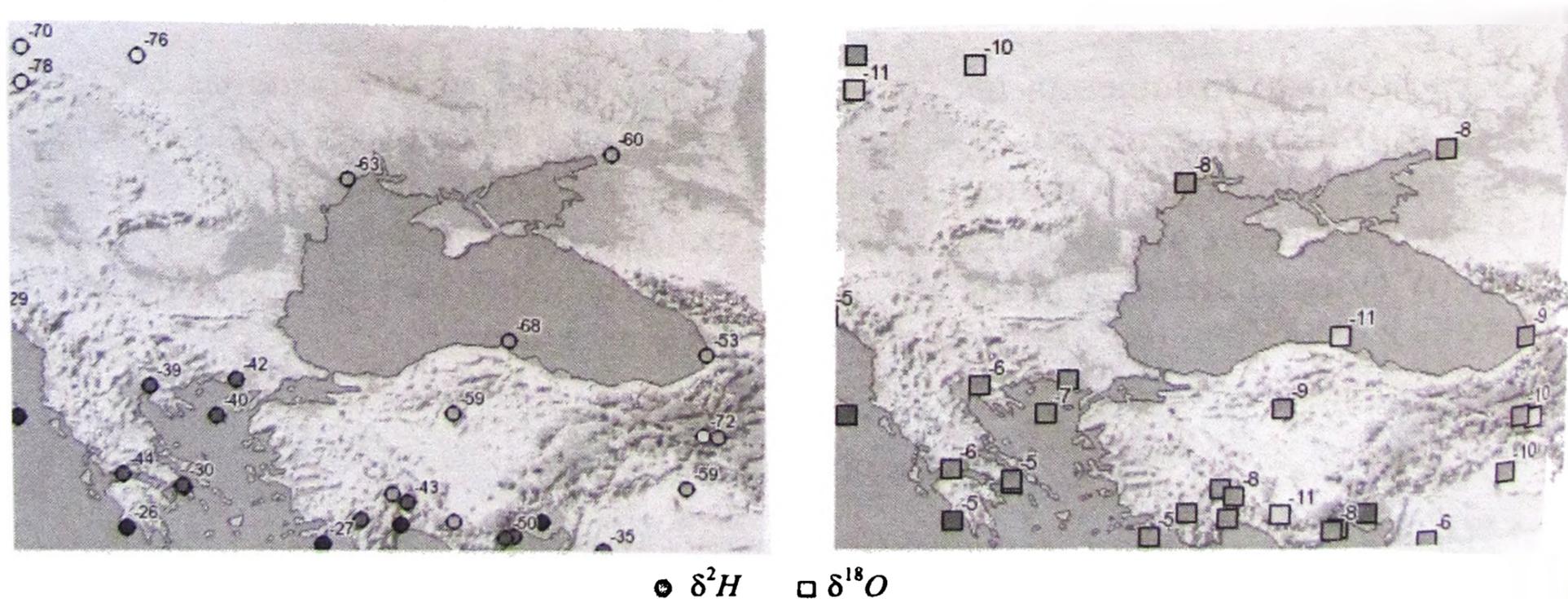


Рис. 4. Изотопный состав атмосферных осадков на станциях глобальной сети (GNIP [5]).

В атмосферных осадках существуют сезонные колебания содержаний изотопов водорода и кислорода с максимальными значениями летом и минимальными зимой (рис. 5). Они вызваны сезонными изменениями температуры конденсации водяного пара [1, 3]. Сезонный ход осадков на различных станциях имеет некоторые отличия. Годичные вариации  $\delta^{18}\text{O}$  в атмосферных осадках могут составлять 5–10% (см. рис. 5).

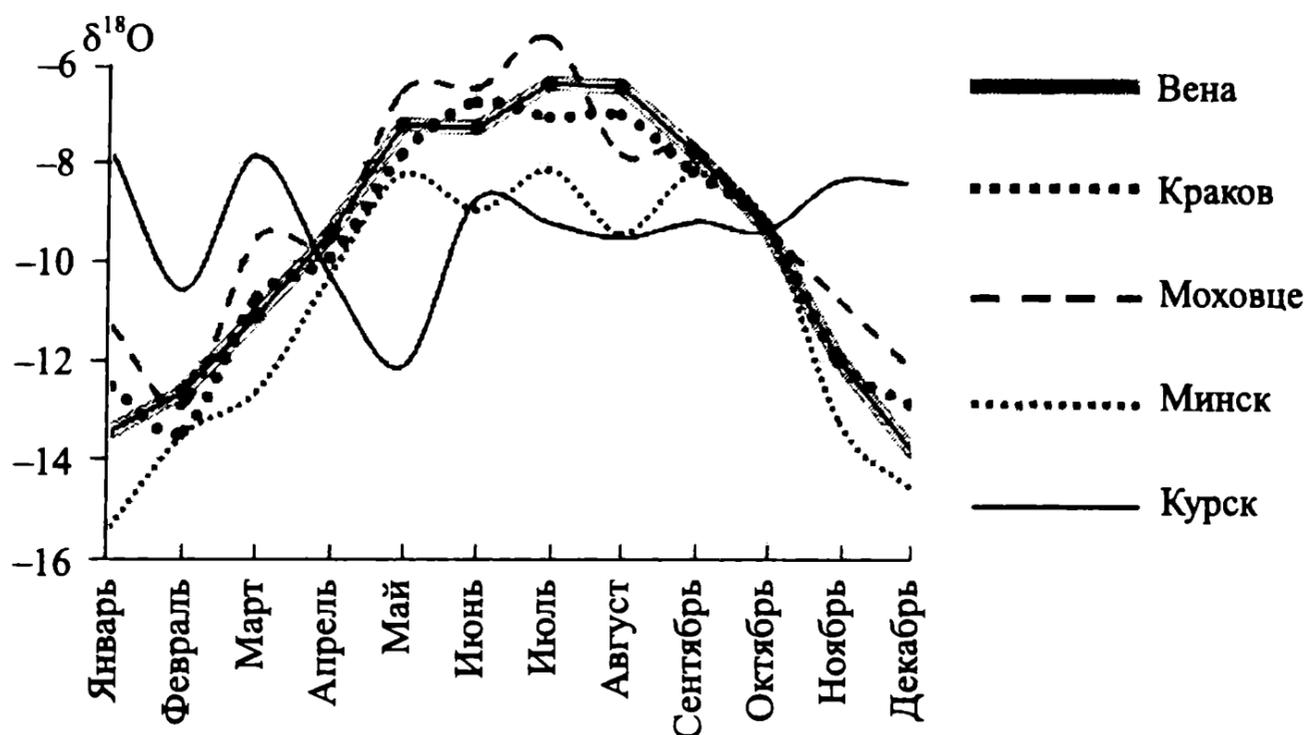


Рис. 5. Внутригодовой ход  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках на отдельных станциях из базы GNIP [5].

Непосредственно для полуострова Крым существует лишь одна представительная публикация [6], в которой приведены средневзвешенные значения  $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  атмосферных осадков для станций г. Симферополь (Предгорья Крыма) и г. Чатырдаг (Главная гряда Крымских гор).

Во всем мире для интерпретации изотопных данных используют глобальную линию метеорных вод (ГЛМВ) [2]:  $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$ , однако в конкретных местных условиях линия метеорных вод может быть несколько смещена и имеет другой уклон. Например, линия метеорных вод Восточного Средиземноморья  $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 22$  [7]. Для станции в Вене, близкой по высотным отметкам к району исследования и имеющей длинный и представительный ряд наблюдений, линия метеорных вод  $\delta^2\text{H} = 7,2 \cdot \delta^{18}\text{O} - 0,34$  [5]. Локальная линия метеорных вод северного склона Крымских гор описывается линией  $\delta^2\text{H} = 7 \cdot \delta^{18}\text{O} + 3,2$  [6].

На рис. 6 показаны взаимоотношения между ГЛМВ и локальными линиями метеорных вод. Интересно отметить, что линия метеорных вод Крыма (точнее, северного склона Главной гряды) отстоит дальше от линии метеорных

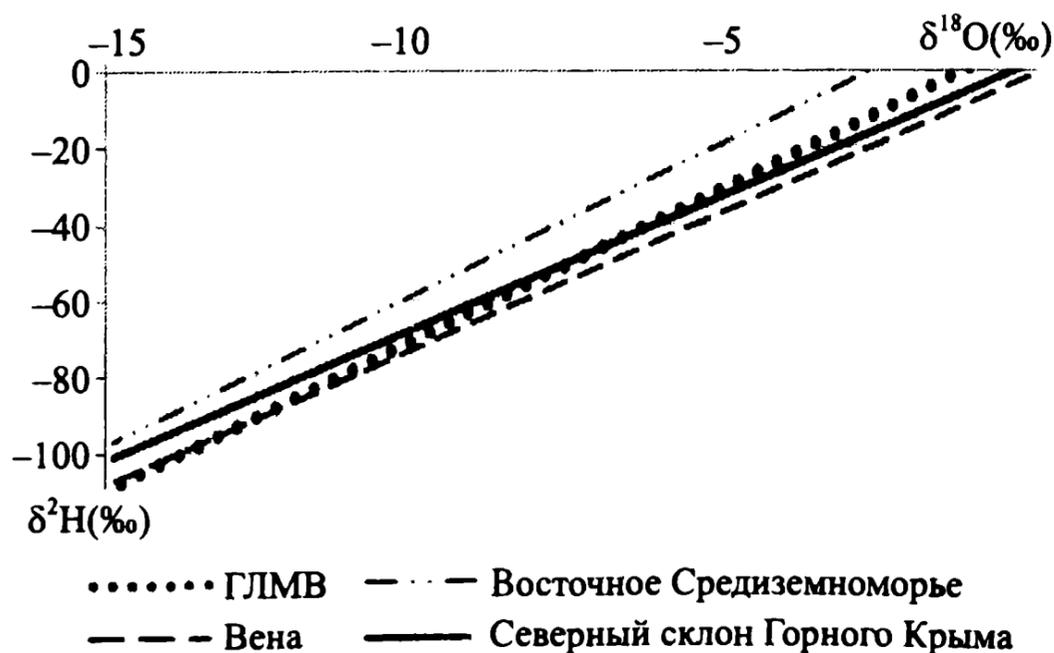


Рис. 6. Взаимодействие глобальной линии (ГЛМВ) с локальными линиями метеорных вод.

вод Восточного Средиземноморья, чем от линии в Вене. При недостатке данных можно воспользоваться материалами многолетнего мониторинга станции Вена, находящимися в свободном доступе [5].

### Результаты и обсуждения

Все полученные за период исследования изотопные данные ( $\delta^{2}\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ ) природных вод бассейна р. Бодрак сведены в табл. 2 и представлены на графиках в координатах  $\delta^{18}\text{O} \div \delta^{2}\text{H}$  относительно глобальной линии метеорных вод, изображена также локальная линия метеорных вод северного склона Крымских гор [6].

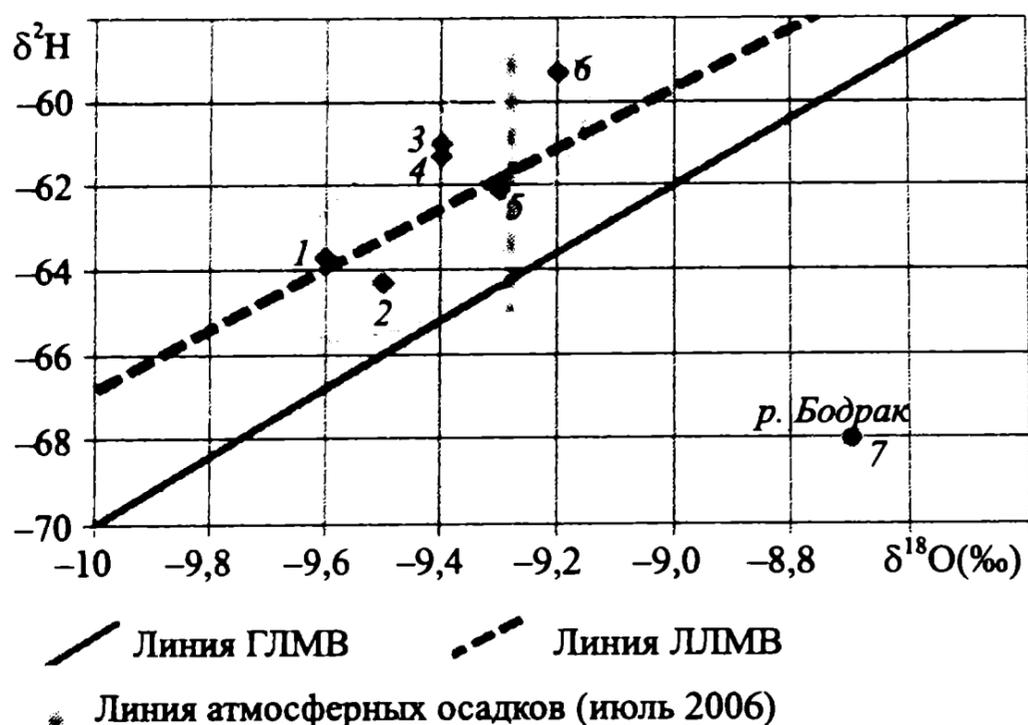


Рис. 7. Изотопный состав природных вод бассейна р. Бодрак (июль 2006 г.).

На графике (рис. 7) показаны данные 2006 г. опробования (через облако точек 1–6 проходит линия единственной в 2006 г. пробы атмосферных осадков). График (рис. 8) включает все пробы за период исследования. Проанализированные пробы подземных вод 2006 г. (точки 1–6) имеют небольшой разброс и, следовательно, родственный генезис. Все точки подземных вод сгруппированы и располагаются вдоль локальной линии (ЛЛМВ), что является доказательством их метеогенной природы.

Питание во всех образцах подземных вод осуществляется за счет местных атмосферных осадков. Все точки подземных вод (1–6) располагаются в непосредственной близости от линии местных метеорных вод, их области питания и разгрузки практически совпадают, т. е. подземные воды точек 1–6 имеют местное происхождение (рис. 7).

Таблица 2. Изотопные данные природных вод бассейна р. Бодрак

№	Место взятия пробы	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰	$\delta^{2}\text{H}$ , ‰	Дата отбора	Лаборатория	GPS привязка
1	колодец Севаст. 4	-9,6	-63,7	июль 2006 г.	ВСЕГЕИ	44°47'30"N; 33°59'21"E
2	родник Вербочки	-9,5	-64,3	июль 2006 г.	ВСЕГЕИ	44°46'37"N; 33°59'29"E
3	родник Патиль	-9,4	-61,0	июль 2006 г.	ВСЕГЕИ	44°46'18"N; 33°59'46"E
4	родник Пост.двор	-9,4	-61,3	июль 2006 г.	ВСЕГЕИ	44°46'41"N; 34°00'02"E
5	родник Эмиров	-9,3	-61,5	июль 2006 г.	ВСЕГЕИ	44°47'04"N; 33°59'41"E
6	колодец Калин.19	-9,2	-59,3	июль 2006 г.	ВСЕГЕИ	44°47'21"N; 33°59'39"E
7	р.Бодрак, у г. Кермен	-8,7	-68,0	июль 2006 г.	ВСЕГИНГЕО	44°46'34"N; 34°00'33"E
8	атмосферные осадки	-9,3	н.о.	июль 2006 г.	ВСЕГЕИ	44°47'10"N, 33°59'59"E
9	атмосферные осадки	-7,9	н.о.	июль 2009 г.	ВСЕГЕИ	44°47'10"N, 33°59'59"E
10	р.Бодрак, Скалистое	-7,2	-48,8	декабрь 2011 г.	СПбГУ	44°48'23"N, 33°58'41"E
11	атмосферные осадки	-5,73	-39,3	июнь 2011 г.	СПбГУ	44°47'10"N, 33°59'59"E
12	атмосферные осадки	-4,49	-36,3	декабрь 2011 г.	СПбГУ	44°47'10"N, 33°59'59"E

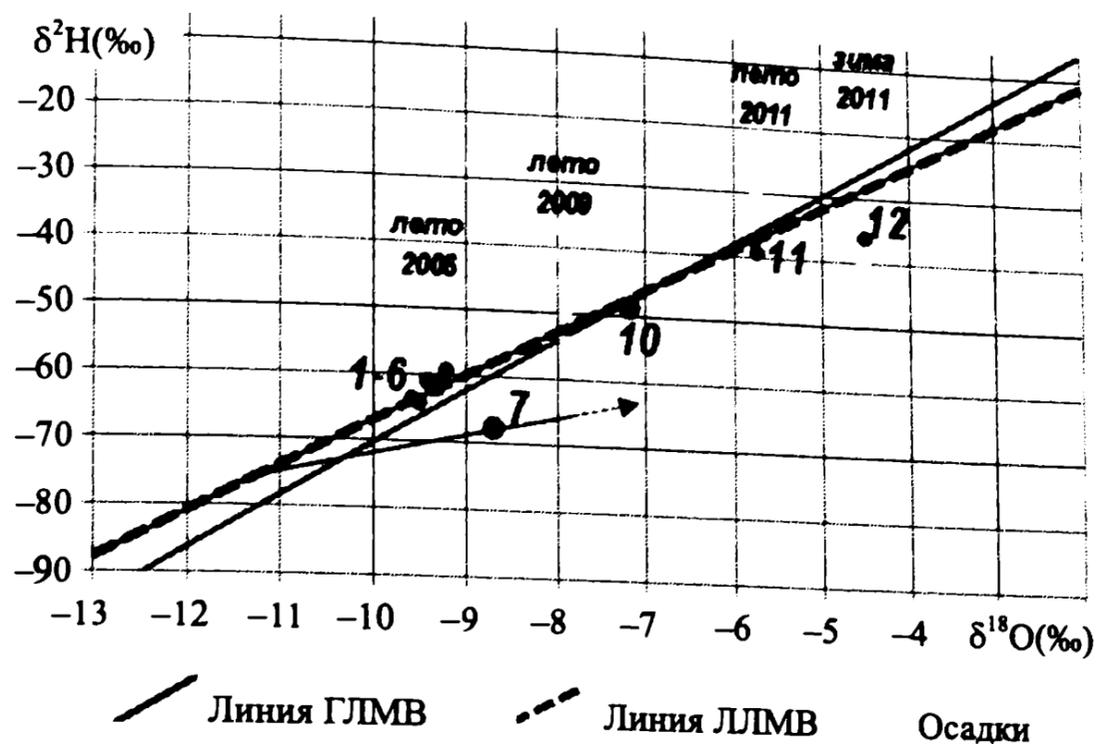


Рис. 8. Изотопный состав природных вод бассейна р. Бодрак за период 2006–2011 гг.

На графике (см. рис. 7) хорошо видно, что проба воды № 7 (р. Бодрак, июнь 2006 г.) в отличие от остальных занимает особое положение. Вариации изотопов природных вод обусловлены фракционированием (разделением) в ходе фазовых переходов (при испарении, конденсации, а также при гидратации и дегидратации горных пород). В природных условиях наибольшему фракционированию подвержены изотопы водорода [3, 8]. При испарении воды происходит разделение изотопов (с увеличением относительного содержания  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в жидкой фазе).

Изложенные сведения не подводят к однозначному объяснению положения точки р. Бодрак (проба № 7). Смещение могло произойти вследствие смешивания с другими водами или по каким-либо другим причинам.

Атмосферные осадки холодных месяцев года обеднены тяжелыми изотопами кислорода и водорода по сравнению с теплыми месяцами (рис. 9). Сравнительные графики хода осадков станции в Вене и метеостанции д. Трудолюбовки позволяют прогнозировать изотопный состав при отсутствии данных.

Согласно рис. 9 атмосферные осадки, сформировавшие меженный сток в июле 2006 г., могли выпасть в зимние месяцы. По данным метеостанции пос. Почтовый, в декабре 2005 г. выпало около 90 мм осадков. Меженный сток р. Бодрак выступает как показатель подземного стока наиболее устойчивой его части.

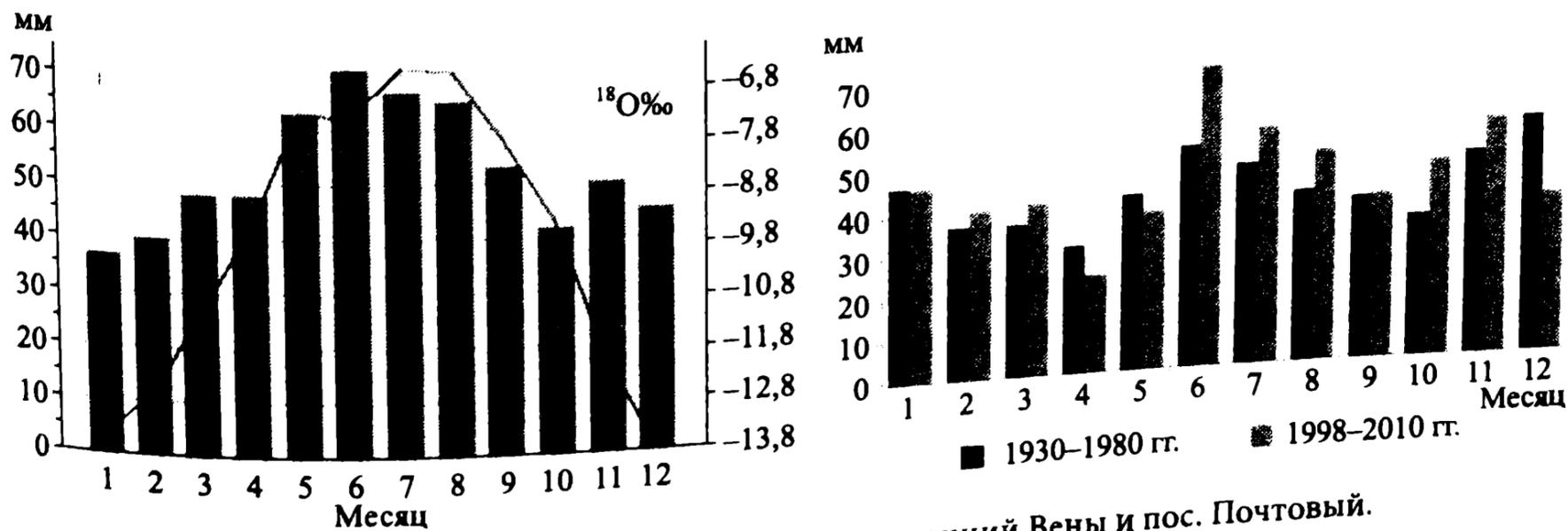


Рис. 9. Годовой ход атмосферных осадков станций Вены и пос. Почтовый.

Чтобы выяснить, как водный режим р. Бодрак согласуется с ходом атмосферных осадков, найдем зависимость расходов р. Бодрак от хода осадков. Имея в своем распоряжении лишь данные по расходам р. Бодрак за период 1963–1967 гг. [9], построим график, используя эти данные и нормы температуры воздуха и количества атмосферных осадков за 1930–1980 гг. (рис. 10). Наибольшую корреляцию расход р. Бодрак с ходом атмосферных осадков имеет при временном сдвиге в два месяца ( $R^2 = 0,8$ ).

Так как водный режим р. Бодрак отстает от хода осадков (см. рис. 10), а в зимние месяцы атмосферные осадки имеют более легкий изотопный состав (рис. 5), то именно осадки зимних месяцев формируют сток. Проба № 7 была отобрана в межень и потому представляет собой подземные воды, генетически связанные с зимними осадками, прошедшими трансформацию. На диаграмме  $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$  видно, что состав воды р. Бодрак сформировался из изотопно более легких осадков (точка пересечения ЛЛМВ и линии, на которой лежит точка р. Бодрак), следовательно, области питания вод, формирующих сток р. Бодрак, располагаются гипсометрически выше, чем области питания исследуемых родников и колодцев (см. рис. 8).

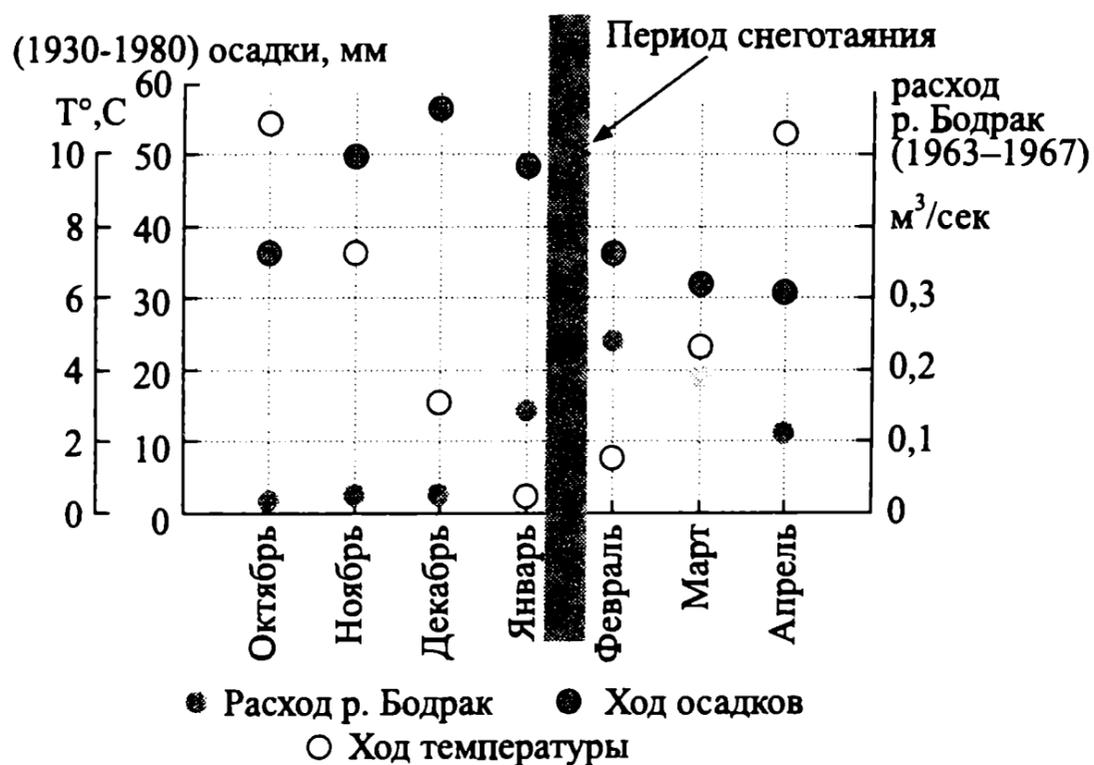


Рис. 10. Зависимость расходов р. Бодрак от хода атмосферных осадков и температуры воздуха.

Вода р. Бодрак в осеннее-зимний и весенний периоды обедняется тяжелыми изотопами, а в летний — обогащается. В гидрохимическом составе также наблюдаются сезонные изменения: в теплый период года вода р. Бодрак имеет большую минерализацию, так как летом преобладает подземное питание (межень).

### Выводы

Изотопный состав природных вод бассейна р. Бодрак позволяет утверждать, что в подавляющем большинстве воды на территории бассейна пресные и имеют инфильтрационный генезис.

Грунтовые воды бассейна р. Бодрак формируются в основном за счет местных атмосферных осадков. Район отличается высокими скоростями водообмена неглубокозалегающих подземных вод.

Области питания вод, формирующих сток р. Бодрак, располагаются гипсометрически выше, чем области питания грунтовых вод. Режим р. Бодрак имеет временной сдвиг около двух месяцев по сравнению с ходом атмосферных осадков; летний меженный сток р. Бодрак осуществляется за счет зимних осадков. Вода р. Бодрак в осенне-зимний и весенний периоды обедняется тяжелыми изотопами, в летний — обогащается. По соотношению  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$  р. Бодрак соответствует рекам зоны умеренного климата.

Автор благодарит Э. М. Прасолова, Г. М. Ельцову и И. В. Токарева за консультации, поддержку и помощь в выполнении дорогостоящих анализов на содержание изотопов в воде.

### Литература

1. *Stable Isotope. Hydrology. Deuterium and oxygen-18 in water cycle.* IAEA TRS-210. Vienna: IAEA, 1981. 439 p.

2. *Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science, 1961. N 133. P. 1702–1703.*

3. *Ферронский В. И., Поляков В. А. Изотопы гидросферы Земли. М.: Недра, 2009. 632 с.*

4. *Криосфера Земли. 2010. Т. XIV, № 1. С. 13–21.*

5. *Сайт Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) «Global Network Isotopes in Precipitation» (GNIP). URL: [http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS\\_resources\\_gnip.html](http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html) (дата обращения 10.07.2011).*

6. *Дублянский Ю. В., Климчук А. Б., Амеличев Г. Н., Токарев С. В., Шнётль К. Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор // Спелеология и карстология. Симферополь. 2012. № 9. С. 14–21.*

7. *Gat J. R. The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation // eds P. Fritz, J.-Ch. Fontes. Handbook of environmental isotope geochemistry The Terrestrial Environment. A. Elsevier, Amsterdam, 1980. Vol. 1. P 21–48.*

8. *Дубинчук В. Т., Поляков В. А., Корниенко Н. Д. Ядерно-геофизические методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1988. 223 с.*

9. *Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т. 6. Украина олдэвия. Вып. 4. Крым / под ред. М. И. Цукановой. Л.: Гидрометеиздат, 1980. С. 120.*

Статья поступила в редакцию 20 июня 2013 г.