



**Ю.В. Дублянський, А.Б. Климчук, Г.Н. Амеличев, С.В. Токарев, К. Шпётль**

## **Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор**

Дублянський Ю.В., Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Токарев С.В., Шпётль К. Изотопний склад атмосферних опадків і карстових джерел северо-западного схилу Кримських гір // Спелеологія і карстологія, - № 9. – Симферополь. – 2012. – С. 14-21.

**Резюме:** Приводяться результати режимних досліджень по методикі GNIP ізотопного складу опадків для станцій в Симферополі (24 місяці) і на Чатырдагу (15 місяців), а також вод деяких джерел та однієї свердловини Гірського Криму. Залежність між  $\delta D$  і  $\delta^{18}O$  атмосферних опадків і водопровів близька до глобальної лінії метеорних вод. Характер кривих і відмінності в кореляції окремих ділянок часових рядів з температурою повітря вказує на множинність чинників, контролюючих ізотопний склад опадків, причому режими формування опадків, що розрізняються, реалізувалися в одному і тому ж періоді на близько розташованих (у 23 км одна від одної) станціях.

Води семи карстових джерел, що відносяться до Долгоруковської яйли (2), Чатырдагу (1), Байдарської котловини (3) і Мангуп-кале (1), характеризуються ізотопними значеннями, більш легкими, ніж середньорічні значення атмосферних опадків в їх областях живлення. Склад вод підземної річки Червоної печери практично постійний, і, таким чином, не пов'язаний з ходом зміни атмосферних опадків і режимом водності. Ці характеристики вказують на велику буферну і гомогенізуючу роль ґрунтового покриву і епікарстової зони і на переважання долі зимового живлення в загальному балансі. Ще легші значення глибоких вод зі свердловини біля Червоної печери, можливо, пояснюються їх древнім, доголоценовим, віком.

**Ключові слова:** ізотопний склад; ізотопи вуглецю; ізотопи кисню; ізотопи водню; дейтерій; атмосферні опадки; підземні води; карстові джерела; епікарст; Гірський Крим.

Дублянський Ю.В., Климчук О.Б., Амеличев Г.М., Токарев С.В., Шпётль К. Изотопний склад атмосферних опадків і карстових джерел північно-західного схилу Кримських гір // Спелеологія і карстологія, - № 9. – Симферополь. – 2012. – С. 14-21.

**Резюме:** Наведено результати режимних досліджень за методикою GNIP ізотопного складу опадків для станцій в Симферополі (24 місяці) і на Чатырдагу (15 місяців), а також вод деяких джерел та однієї свердловини Гірського Криму. Залежність між  $\delta D$  і  $\delta^{18}O$  атмосферних опадків і водопровів близька до глобальної лінії метеорних вод. Характер кривих і відмінності в кореляції окремих ділянок часових рядів з температурою повітря вказує на множинність чинників, контролюючих ізотопний склад опадків, причому режими формування опадків, що розрізняються, реалізувалися в одному і тому ж періоді на близько розташованих (у 23 км одна від одної) станціях.

Води семи карстових джерел, що відносяться до Долгоруковської яйли (2), Чатырдагу (1), Байдарської улоговини (3) і Мангуп-кале (1), характеризуються ізотопними значеннями, більш легкими, ніж середньорічні значення атмосферних опадків в їх областях живлення. Склад вод підземної річки Червоної печери практично постійний, і, таким чином, не пов'язаний з ходом зміни атмосферних опадків і режимом водності. Ці характеристики вказують на велику буферну і гомогенізуючу роль ґрунтового покриву і епікарстової зони і на переважання долі зимового живлення в загальному балансі. Ще легші значення глибоких вод зі свердловини біля Червоної печери, можливо, пояснюються їх древнім, доголоценовим, віком.

**Ключові слова:** ізотопний склад; ізотопи вуглецю; ізотопи кисню; ізотопи водню; дейтерій; атмосферні опадки; підземні води; карстові джерела; епікарст; Гірський Крим.

<sup>1</sup> Університет Інсбрука, Австрія

<sup>2</sup> Український Інститут спелеології і карстології МОНМС України і НАН України при ТНУ ім. В.І.Вернадського, Симферополь, Україна

\*Корреспондуючий автор: E-mail: kyoto\_yuri@mail.ru

Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Amelichev G.N., Tokarev S.V., Spötl, C. Isotopic composition of atmospheric precipitation and karstic springs of the north-west slope of the Crimean Mountains // *Speleology and Karstology*, - № 9. – Simferopol. – 2012. – P. 14-21.

**Abstract:** Atmospheric precipitation was sampled for isotopic analyses according to GNIP protocol at two stations in Crimea, Ukraine: Simferopol (24 months) and Chatyrdag (15 months). In addition, several karstic springs and one well tapping deep karstic aquifer were sampled. The  $\delta D$  vs.  $\delta^{18}O$  relationship is only slightly differs from global Meteoric Water Line. Variable degrees of correlation with the air temperature and the precipitation amount suggest that the isotopic composition of precipitation is affected by several processes (e.g., air temperature and supply of moisture from different sources). Interestingly, drastically different make-ups of precipitation were observed simultaneously at two stations located only 23 km apart.

Waters in seven karstic springs discharging at Dolgorukovsky massif (2), Chatirdag (1), Baidarsky basin (3), and Mangup-kale (1) have isotopic compositions that follow local meteoric water line but are lighter than weighted annual mean values for their respective catchment areas. Isotopic composition of the underground stream in Krasnaya (Red) cave is nearly constant and thus, decoupled from changes in both the isotopic composition of atmospheric precipitation in the recharge area and the flow regime (flood or base flow). This suggests a strong buffering and homogenizing role of the soil cover and the epikarst zone, as well as the predominant role of winter recharge on these karst massifs. Still lighter isotopic composition of deep karstic water tapped by a borehole is tentatively explained by old, pre-Holocene age of this water.

**Keywords:** isotopic composition; isotopes of carbon; isotopes of oxygen; isotopes of hydrogen; deuterium; atmospheric precipitation; ground waters; karstic springs; epikarst; Crimean Mountains.

## ВВЕДЕНИЕ

Изотопный состав атмосферных осадков – важный параметр, знание которого необходимо при метеорологических, гидрогеологических и палеоклиматических исследованиях. Глобальный мониторинг содержания изотопов водорода и кислорода в осадках проводится с 1961 г. в рамках программы GNIP (Global Network on Isotopes in Precipitation) под совместным патронажем МАГАТЭ (IAEA) и Всемирной метеорологической организации (World Meteorological Organization, WMO). Создаются также национальные сети наблюдений, поставляющие данные с более высоким пространственным и временным разрешением (к примеру, с 2007 г. функционирует ANIP; Austrian Network of Isotopes in Precipitation and Surface Waters).

Понимание процессов формирования изотопного сигнала просачивающихся вод, питающих водоносные горизонты и комплексы и отлагающих натёки в пещерах, является одним из необходимых условий для

качественных интерпретаций изотопных характеристик подземных вод и палеоклиматического сигнала спелеотем (пещерных вторичных минеральных отложений). Это понимание невозможно без знания закономерностей изменения изотопного состава атмосферных осадков и их перехода в подземные воды.

Систематические данные по изотопному составу атмосферных осадков Крыма отсутствуют. В районах с хорошим покрытием станциями GNIP или станциями национальных сетей, оценочные характеристики можно получить путем интерполяции. Это метод не может считаться корректным для Крыма, поскольку ближайшие станции сети GNIP (Одесса, Ростов-на-Дону и Синоп) находятся на значительном удалении (300-600 км), и отделены от Крыма акваториями Черного и Азовского морей (рис. 1).

Для получения этой информации, чрезвычайно важной для карстологических, гидрогеологических и



Рис. 1. Ближайшие к Крыму станции GNIP (показаны квадратными знаками).

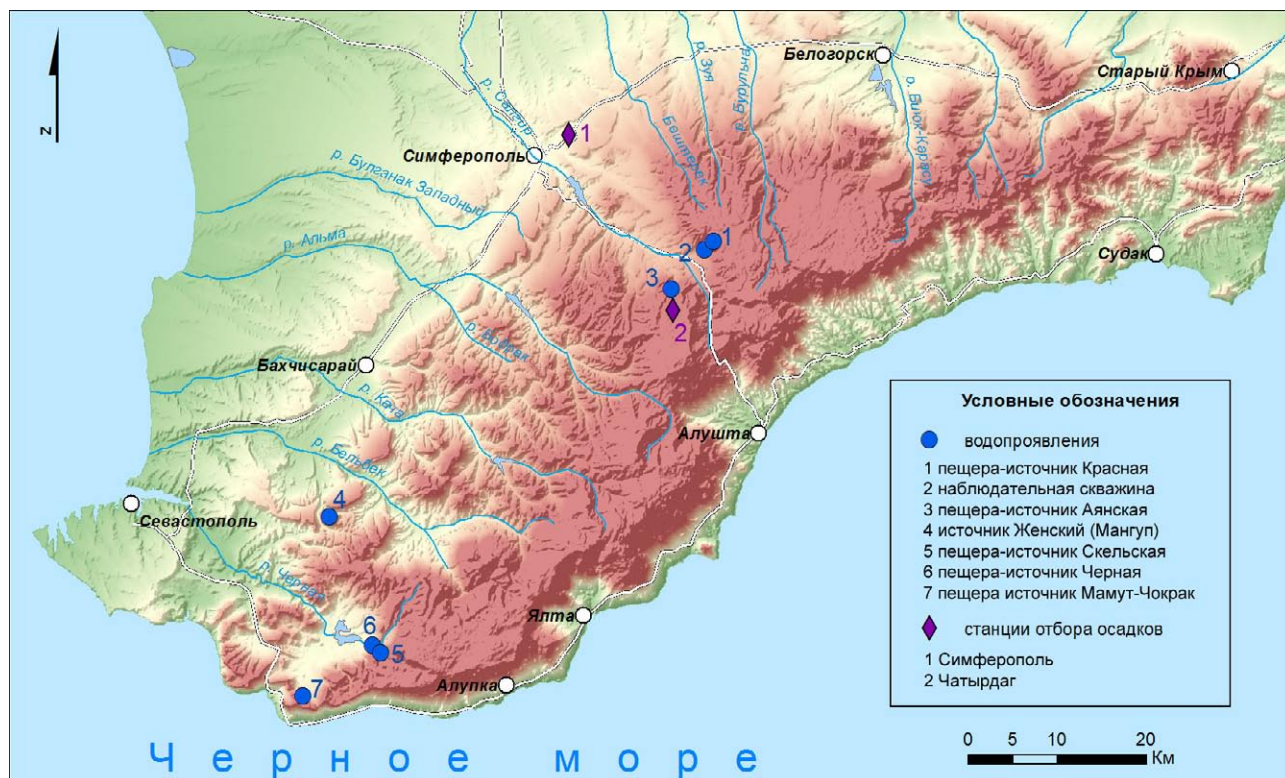


Рис. 2. Станции отбора проб атмосферных осадков и опробованные водопроявления

палеоклиматологических исследований, Украинский институт спелеологии и карстологии МОНМС Украины и НАН Украины и Университет Инсбрука (Австрия) начали в 2009 г. совместный проект, в рамках которого проводилось опробование атмосферных осадков по методике GNIP. В настоящем сообщении мы представляем результаты первых двух лет наблюдений для двух станций (Симферополь, 24 месяца и Чатырдаг, 15 месяцев). Параллельно с накоплением систематических данных по атмосферным осадкам, были опробованы отдельные водопроявления Горного Крыма (рис. 2).

Следует подчеркнуть, что представляемые результаты характеризуют северный склон Главной гряды Крымских гор. Приложимость выявленных закономерностей к южному склону гряды требует экспериментального подтверждения.

## 1. МЕТОДЫ

### 1.1. Отбор проб

Станции для отбора ежемесячных проб воды (рис. 2) были организованы в Симферополе (N 44.98°, E 34.15°, высота 290 м в.у.м.; с октября 2009 г.) и на северном склоне нижнего плато массива Чатырдаг (N 44.80°, E 34.29°, высота 980 м в.у.м.; с октября 2010 г.).

В соответствии с методикой GNIP, пробы отбирались в специальный контейнер в течение календарного месяца, после чего вода сливалась, тщательно перемешивалась, и около 100 мл отбиралось для изотопного анализа. Особое внимание уделялось тому, чтобы вода не подвергалась испарению во время накопления (недостаток изоляции и испарение привели

к изменению первичного изотопного состава проб апреля-мая 2010 г.; эти анализы не были включены в базу данных). Пробы из различных водопроявлений отбирались в плотно закрывающиеся пробирки (заполняются полностью). Все пробы, до отправки на анализ, хранились в холодильнике.

### 1.2. Изотопные анализы

Изотопные анализы проводились в Университете Инсбрука (Австрия). Изотопный состав водорода ( $\delta D$ ) определялся на масс-спектрометре Delta V Advantage, оснащенный автоматическим пробоотборником AS3000, устройством TC/EA и интерфейсом ConFlo II (все устройства Thermo Scientific). Микропорции воды (0.4 мкл), транспортируемые потоком гелия, разлагались в TC/EA на молекулярный водород и окись углерода за счет реакции со стеклообразным углеродом при 1400°C. Выделившийся водород поступал для анализа в масс-спектрометр. Каждая проба характеризовалась не менее чем девятью измерениями; выборочно, около 10% проб анализировались дважды. Результаты обрабатывались статистически и нормализовались относительно стандарта SMOW. Средняя точность измерений 1 ‰.

Изотопный состав кислорода ( $\delta^{18}O$ ) определялся на масс-спектрометре Delta Plus XL, оснащенный автоматическим пробоотборником PAL и интерфейсом GasBench II (все устройства Thermo Scientific). Анализ проводился методом изотопного уравнивания с  $CO_2$ . Каждая проба характеризовалась семью измерениями. Результаты обрабатывались статистически и нормализовались относительно стандарта SMOW. Средняя точность измерений 0.1 ‰.

Для пересчета измеренных значений  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  в стандарт SMOW использовались лабораторные стандарты, калиброванные относительно стандартов МАГАТЭ (V-SMOW, V-SLAP и V-GISP).

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Локальная линия метеорных вод

Со времен новаторской работы Крэйга (Craig, 1961) известно, что в глобальном масштабе, изотопы водорода и кислорода атмосферных осадков подчиняются взаимоотношению, известному как Линия Метеорных Вод (Meteoric Water Line, MWL), имеющему вид:

$$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \quad (1)$$

При определенных сочетаниях климатических и географических параметров, взаимоотношение изотопов, оставаясь линейным, может отличаться от уравнения (1). Такие взаимоотношения получили название локальных линий метеорных вод (Local Meteoric Water Line; LMWL). К примеру, LMWL для средиземноморского бассейна имеет вид (Gat, 1980, 1982):

$$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 22 \quad (2)$$

Отклонение средиземноморских изотопных характеристик от глобальных вызвано интенсивным испарением с поверхности моря при контакте с воздушными массами, имеющими низкую влажность. Поскольку Крымский полуостров окружен значительными по площади водными бассейнами, следует проверить гипотезу о возможном различии в параметрах локальной линии метеорных вод для Крыма и глобальной линии метеорных вод.

Локальная линия метеорных вод для Крыма (точнее, для северного склона Крымских гор), построенная по результатам двухлетних наблюдений, показана на рис. 3. Параметры линии выражаются как:

$$\delta D = 7.0 \cdot \delta^{18}O + 3.2 \quad (3)$$

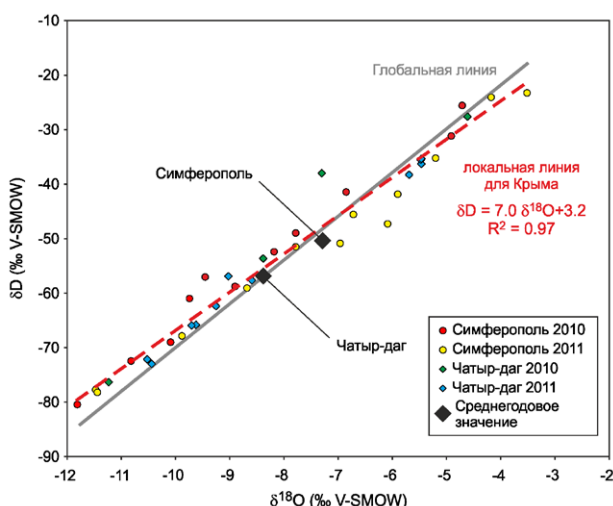


Рис. 3. Локальная линия метеорных вод (штриховая красная линия) для северного склона Крымских гор и среднегодовые изотопные значения атмосферных осадков для двух станций. Глобальная Линия Метеорных Вод (серая сплошная линия) показана для сравнения.

Точность аппроксимации  $R^2 = 0.966$ . В пределах интервала измеренных значений, эта линия лишь слегка отличается от глобальной Линии Метеорных Вод; разница не превышает  $0.5 \text{ ‰ } \delta^{18}O$ , что меньше стохастических отклонений изотопного состава осадков от метеорной линии (обычно,  $\pm 1 \text{ ‰}$ ). Среднегодовые значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  атмосферных осадков, рассчитанные для двух станций по результатам измерений 2011 г., приведены в таблице 1.

Таблица 1

Средневзвешенные значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  атмосферных осадков для станций Симферополь и Чатырдаг в 2011 г.

Станция	Высота в.у.м. (м)	$\delta^{18}O$ (‰ V-SMOW)	$\delta D$ (‰ V-SMOW)
Симферополь	280	-7.4	-50.2
Чатырдаг	980	-8.6	-57.8

Среднегодовые значения несколько ниже для станции Чатырдаг, расположенной на большей высоте. Разница в  $1.2 \text{ ‰ } \delta^{18}O$  при разнице высот 700 м соответствует высотному градиенту  $-0.17 \text{ ‰}/100 \text{ м}$ . Это значение несколько ниже среднего по Европе ( $-0.21 \text{ ‰}/100 \text{ м}$ ), однако лежит в пределах вариаций значений, полученных для различных европейских регионов (от  $-0.15$  до  $-0.40 \text{ ‰}/100 \text{ м}$ ; Poage and Chamberlain, 2001). Высотный градиент для  $\delta D$  составляет  $-1.1 \text{ ‰}/100 \text{ м}$ .

### 2.2. Изменение изотопного состава атмосферных осадков в течение года

В течение года, изотопный состав атмосферных осадков изменяется в довольно широких пределах ( $\sim 60 \text{ ‰}$  для  $\delta D$  и  $\sim 7 \text{ ‰}$  для  $\delta^{18}O$ ). Поскольку изотопный состав водорода и кислорода атмосферных осадков связан линейной зависимостью, дальнейшее обсуждение будет иллюстрироваться данными для одного изотоба,  $\delta D$ .

На рис. 4 показан годовой ход  $\delta D$  для двух станций в 2009-2011 гг. График для станции Чатырдаг в 2011 г. показывает довольно простой характер изменений, характеризующийся низкими значениями в холодные зимние месяцы и более высокими значениями – в летние. Такое изменение, в целом, соответствует годовому ходу температур (коэффициент корреляции  $r = 0.83$ ).

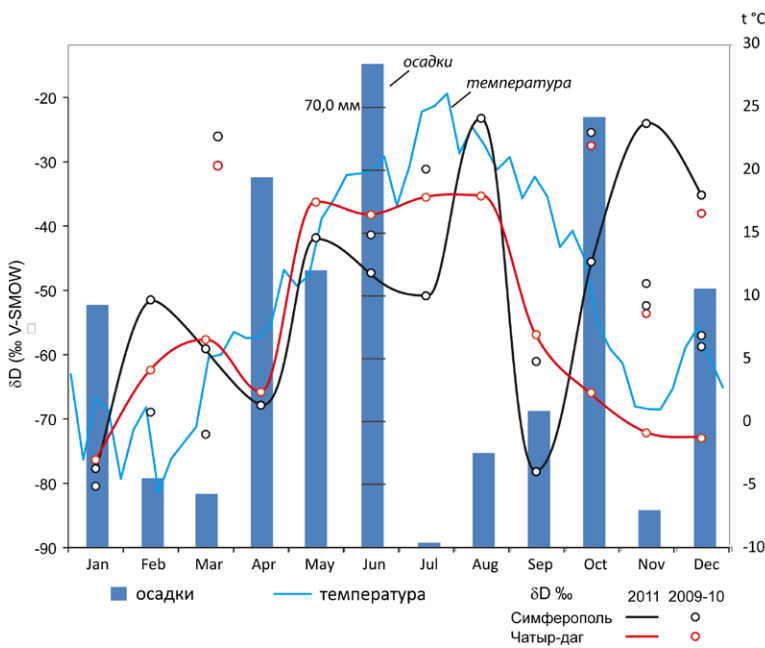


Рис. 4. Изменение изотопного состава атмосферных осадков для станций Симферополь и Чатырдаг по месяцам. Месячные суммы осадков (столбики), температура (голубая линия) даны для 2011 г. по данным метеостанции Симферополь (WMO 33946), представленным на WEB-сайте «Расписание Погоды» (гр5.ua).

Изменения для станции Симферополь несколько более сложные. Для 2010 г., среднемесячные значения  $\delta D$  и  $T$  также показывают значительную корреляцию ( $r = 0.72$ ). В 2011 г., однако, ситуация изменилась. С января по август значения  $\delta D$  возрастают, однако рост не монотонный, а с осцилляциями амплитудой 20-30 ‰. С августа по декабрь, вместо монотонного снижения, наблюдаются высокоамплитудные (50-55 ‰) колебания. В результате, корреляция между изотопным составом и среднемесячной температурой воздуха практически исчезает ( $r = 0.21$ ). Можно предположить, что значительное влияние на изотопный состав осадков Симферополя в 2011 г. оказывал привнос атмосферной влаги различного происхождения, практически не зависящий от температуры воздуха. Интересно также, что два различных режима (контролируемый температурой и контролируемый привносом влаги; рис. 4) могут реализоваться одновременно на станциях удаленных друг от друга на незначительное расстояние (расстояние между станциями Симферополь и Чатырдаг – около 23 км).

### 2.3. Изотопный состав карстовых источников и подземных вод

Накопление эмпирических данных об изотопном составе подземных вод Крыма только начинается. На рис. 5 приведены результаты анализов вод нескольких водопроявлений:

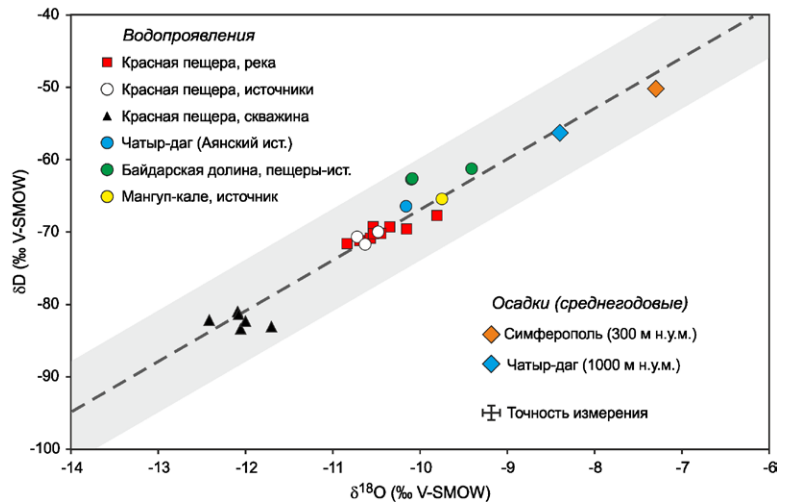


Рис. 5. Изотопный состав различных водопроявлений горного Крыма. Локальная линия метеорных вод показана штриховой линией, вместе с «коридором»  $\pm 1$  ‰  $\delta^{18}O$ .

- группа водопроявлений урочища Краснопещерного, в которую входят подземная река Красной пещеры, источник на Туфовой площадке, источник №33 ниже по долине Краснопещерной реки), а также изливающая с глубины около 60 м наблюдательная скважина, пробуренная у подножья западного склона Долгоруковского массива;
- Аянский источник у подножья северного склона массива Чатырдаг;
- пещеры-источники Байдарской котловины (Скельская, Черная и Мамут-Чокрак);
- малобитный источник Женский на массиве Мангуп-кале в предгорном Крыму, вероятно дренирующий эпикарстовую зону, возможно с долей формирующегося в ней конденсационного питания.

Из рисунка видно, что изотопный состав всех водопроявлений хорошо согласуется с локальной линией метеорных вод, определенной в разделе 2.1. При этом воды источников существенно (на 5-13 ‰  $\delta D$  и на 1.3-2.2 ‰  $\delta^{18}O$ ) «легче» средневзвешенного годового состава атмосферных осадков на высоте области питания этих источников (таблица 2).

Результаты периодических измерений изотопного состава вод реки в Красной пещере и наблюдательной скважине, проведенных в октябре 2009 – марте 2010, а также характеристики атмосферных осадков на станции Симферополь (20 км к СЗ от пещеры) для осени-весны 2009-10 гг., показаны на рис. 6.

Воды подземной реки Красной пещеры имеют довольно постоянный состав  $\delta D = -70.0 \pm 1.5$  ‰ и  $\delta^{18}O = 10.4 \pm 0.3$  ‰ (возможно наличие сглаженного максимума в декабре, однако его амплитуда близка к аналитической погрешности). Включенные в рис. 6

**Таблица 2**

Сравнение измеренных изотопных характеристик вод карстовых источников со среднегодовыми характеристиками осадков в их областях питания

Источник или группа источников	Область питания	Высота области питания (м в.у.м.)	$\delta D$ осадков области питания* (‰)	$\delta^{18}O$ осадков области питания* (‰)	$\delta D$ источника (‰)	$\delta^{18}O$ источника (‰)	Разница источник – область питания $\delta D$ (‰)	Разница источник – область питания $\delta^{18}O$ (‰)
Красная пещера, река и группа источников Красной пещеры	Долгоруковская яйла	800-900	-54...-55	-8.0...-8.2	-70...-72	-10.5...-10.7	-16...-17	-2.5
Источник Аян	Нижнее плато г. Чатырдаг	950-1050	-55...-56	-8.2...-8.4	-66	-10.2	-10...-11	-1.8...-2
Группа пещер-источников Байдарской котловины	Западная часть массива Ай-Петри	1000-1200	-56...-59	-8.4...-8.7	-61...-63	-9.4...-10.1	-4...-5	-1.3
Источник Женский, Мангуп-кале	Вершинная поверхность массива Мангуп-кале	500-560	-51...-52	-7.5...-7.7	-65	-9.8	-13...-14	-2.1...-2.3

Примечание: \* - среднегодовое значение рассчитанное на основании высотных градиентов определенных в разделе 2.1

данные характеризуют холодный период, который отличается прохождением дождевых и снеговых паводков, приводящих к значительным колебаниям расхода подземной реки (Дублянский и др., 2002). Изотопный состав атмосферных осадков в этот период также изменялся довольно значительно. Однако, как видно из рисунка, все эти факторы практически не оказывают влияния на изотопный состав воды в подземной реке.

Воды глубокого водоносного горизонта (зона замедленной циркуляции) в блоке верхнеюрских известняков, погруженном ниже уровня эрозийного вреза р. Краснопещерной, опробованные в наблюдательной скважине, имеют практически неизменный изотопный состав  $\delta D = -83.0 \pm 1.0$  ‰ и  $\delta^{18}O = -12.9 \pm 0.2$  ‰ (это подтверждено также дополнительным опробованием в 2011 г.). Измеренные  $\delta D$  на 20-25 ‰ легче, чем расчетные среднегодовые значения атмосферных осадков на Долгоруковской яйле, и даже несколько легче самых легких, зимних значений  $\delta D$ , измеренных за 2 года наблюдений.

#### 2.4. Обсуждение

##### Облегченный изотопный состав источников и подземной реки

Наши данные показывают, что  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  вод обследованных карстовых источников, а также подземной реки Красной пещеры существенно

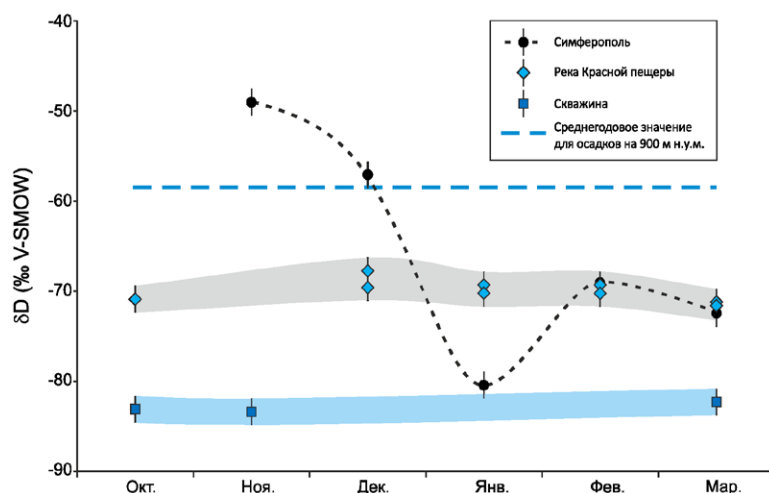


Рис. 6. Изотопный состав ( $\delta D$ ) воды реки в Красной пещере и в скважине с октября 2009 г. по март 2010 г. Для сравнения показан ход изотопного состава осадков в г. Симферополь и расчетный среднегодовой состав осадков на Долгоруковской яйле (800-900 м н.у.м.). Пары значений для реки в пещере характеризуют ситуации максимального и минимального расходов для данного месяца.

легче, чем среднегодовые значения, ожидаемые для атмосферных осадков, выпадающих в областях питания этих источников (см. табл. 2). Это указывает на преобладание зимнего питания этих водопоявлений.

Дублянский (1977) показал, что в летнее время в Горном Крыму только осадки с интенсивностью, превышающей 20 мм/сут, участвуют в питании карстовых вод, тогда как осадки меньшей интенсивности полностью расходуется на испарение (относительная влажность на яйле летом около 58%). Согласно

многoletним наблюдениям, в период с мая по октябрь на Долгоруковской яйле на испарение расходуется от 56 до 90% осадков (Дублянский и др., 2002).

Зимние осадки значительно в большей степени пополняют запасы подземных вод. Этому способствуют более низкие температуры, высокая влажность (90%), и многократное, в течение зимы, стайвание и обновление снегового покрова (Дублянский и др., 2002). Наблюдаемый «изотопно облегченный» характер воды в Красной пещере, а также в других источниках, по-видимому отражает преимущественное зимнее питание карстовой системы. Различие между атмосферными осадками и водой в пещере в ноябре-декабре, когда снеговое питание еще отсутствует, указывает на наличие в системе значительных буферных запасов, которые в условиях приподнятых цокольных известняковых массивов Горного Крыма могут быть связаны только с эпикарстом, так как мощность и запасы фреатической зоны крайне незначительны. Дальнейшая интерпретация изотопных данных потребует более детальных режимных наблюдений.

Данные о преобладании зимнего питания для опробованных Крымских источников указывают на проблемный характер одного из подходов, используемого в гидрогеологии карста, согласно которому высота области питания карстового источника оценивается путем сравнения изотопного состава воды источника и атмосферных осадков с учетом высотного изотопного градиента (Geyh et al., 1988). Для источника Мангуп такой расчет дает высоту области питания ~1800 м в.у.м (реальная высота 500-560 м); для источников Красной пещеры расчетная высота ~2200 м в.у.м (реальная 800-900 м). Очевидно, что подход (Geyh et al., 1988) может использоваться только в том случае, если известно, что вода карстового источника питается атмосферными осадками равномерно в течение года.

#### *Постоянство изотопного состава реки в Красной пещере*

Постоянство изотопного состава, не зависящее ни от режима водности реки Красной пещеры, ни от состава выпадающих в это время на поверхности осадков (рис. 6), согласуется с результатами исследований во многих карстовых районах мира, свидетельствующих о том, что вариации изотопного состава осадков на входе в карстовую систему подавляются при дальнейшем прохождении вод в ней вследствие буферной и гомогенизирующей роли почвенного покрова и эпикарстовой зоны (Ford and Williams, 2007; Климчук, 2009). Базовый (меженный) сток источников обычно характеризуется изотопным составом, близким к среднегодовому составу осадков в области питания, а незначительные вариации связаны с наиболее крупными паводками (Yonge et al., 1985; Geyh et al., 1988). Особенность опробованных источников Крыма состоит в том, что они отражают не среднегодовой, а преимущественно зимний состав осадков зоны питания.

#### *Изотопный состав вод зоны глубокой циркуляции*

Данных для надежной интерпретации изотопно

«облегченного» характера вод, вскрытых скважиной в урочище Красной пещеры, пока не достаточно. Одно из возможных объяснений – эти воды имеют доголоценовый возраст, и характеризуют более холодный климат периода их формирования. Такое объяснение не противоречит глубинному характеру циркуляции вскрытых скважиной вод, который был ранее установлен по повышенной минерализации, специфическому составу газов (метан, сероводород, гелий), восстановительному характеру вод ( $Eh = -170 \dots -250$ ) и повышенной активности элементов уранового ряда (Дублянский и др., 2002).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Опробование атмосферных осадков проводилось по методике GNIP на станциях Симферополь (24 месяца) и Чатырдаг (15 месяцев). Несколько водопроявлений было опробовано при разовых посещениях; три водопроявления опробовались многократно в течение периода наблюдений. Результаты характеризуют северный склон Главной гряды Крымских гор; возможность их использования для южного склона гряды требует экспериментального подтверждения.

Установлено, что зависимость между  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  атмосферных осадков близка к глобальной линии метеорных вод, и выражается как  $\delta D = 7.0 \cdot \delta^{18}O + 3.2$ . Величина высотного изотопного градиента для атмосферных осадков составляет  $-0.17 \text{ ‰}/100 \text{ м}$  для  $\delta^{18}O$ .

Для двух годовых серий наблюдений (Симферополь-2010 и Чатырдаг-2011) ход изотопного состава атмосферных осадков показал значительную корреляцию с температурой воздуха ( $r = 0.7-0.8$ ). В еще одной серии (Симферополь-2011), корреляция была низкой ( $r = 0.2$ ). Такое различие говорит о множественности факторов, контролирующих изотопный состав осадков. Интересно, что кардинально различающиеся режимы формирования осадков реализовались в одном и том же году на станциях, расположенных всего в 23 км друг от друга.

Воды шести карстовых источников относящихся к Долгоруковской яйле (2), Чатырдагу (1) и Байдарской котловине (3), а также малобитного источника на Мангуп-кале показали изотопные составы, соответствующие локальной линии метеорных вод. При этом во всех случаях изотопные значения были легче, чем среднегодовые значения атмосферных осадков в их областях питания. Из этого можно сделать вывод о преобладании зимнего питания для этих источников.

Проведено периодическое опробование подземной реки Красной пещеры в холодный период года (октябрь 2009-март 2010). Несмотря на изменчивость расходов (от низких до паводковых), изотопный состав воды в реке оставался практически постоянным ( $\delta D = -70.0 \pm 1.5 \text{ ‰}$ ,  $\delta^{18}O = 10.4 \pm 0.3 \text{ ‰}$ ). Измеренные значения ниже (на 12 ‰ для  $\delta D$  и 1,8 ‰ для  $\delta^{18}O$ ), чем расчетный среднегодовой состав осадков на Долгоруковской яйле, и практически не связаны с ходом изменения атмосферных осадков. Эти характеристики указывают на большую буферную и гомогенизирующую роль почвенного покрова и

эпикарстовой зоны и преобладание доли зимнего питания в общем балансе питания.

Воды зоны замедленной циркуляции, опробованные в расположенной недалеко скважине 5 раз за трехлетний период (с 2009 по 2011 г.), дали постоянные, и еще более легкие значения ( $\delta D = -83.0 \pm 1.0 \text{‰}$ ,  $\delta^{18}O = -12.9 \pm 0.2 \text{‰}$ ). Такие низкие значения трудно объяснить даже исключительно зимним питанием; в качестве рабочей гипотезы предлагается древний, доголоценовый, возраст этих глубинных подземных вод.

Приведенные данные по изотопному составу водопроявлений фрагментарны, однако уже сейчас видно, что развитие этого направления исследований может дать интересную дополнительную информацию для решения многих до сих пор нерешенных вопросов гидрогеологии крымского карста.

## ЛИТЕРАТУРА

Дублянский В.Н. Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. - Л.: Наука, 1977. - 181 с.

Дублянский В.Н., Вахрушев Б.А., Амеличев Г.Н., Шутов Ю.И. Красная пещера. Опыт комплексных карстологических исследований. - Москва: РУДН, 2002. - 189 с.

Климчук А.Б. Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция. - Симферополь: УИСК-Сонат, 2009. - 112 с.

Ford D., Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. – Wiley, Chichester, 2007. – 562 pp.

Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. // Science - 1961. - №133 (3465) - pp. 1702–1703.

Gat J.R. The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation. // Fritz, P., Fontes, G. Eds., Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 1. - Amsterdam: Elsevier, 1980. - pp. 21–47.

Gat J.R. Precipitation, groundwater and surface waters. Paleoclimates and Paleowaters. // Int. At. Energy Agency, Vienna. - 1982. - pp. 3–12.

Geyh M.A., Michel G., Wagner W. Environmental isotope identification of catchment areas in karst. // 21<sup>st</sup> IAH Congress "Karst hydrogeology and karst environment protection", 10-15 October 1988, Guilin, China. - pp. 58-63.

Poage M.A., Chamberlain C.P. Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters: Considerations for studies of paleoelevation change. // American Journal of Science. - №301. - 2001. - P.1-15.

Yonge C.J., Ford D.C., Gray J., Schwarz H.P. Stable isotope studies of cave seepage water. // Chemical Geology. - №58. - 1985. - P.97-105.