

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чайковский И.И., Кадебская О.И., Жак К. Морфология, состав, возраст и природа карбонатных сферолитов из пещер Западного Урала // *Геохимия*. – 2014. – № 4. – С. 373–384. DOI: 10.7868/S0016752514020046.
2. Cheng H., Edwards R.L., Hoff J., Gallup C.D., Richards D.A., Asmerom Y. The half-lives of uranium-234 and thorium-230 // *Chemical Geology*. – 2000. – V 169, № 1-2. – P. 17-33. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00157-6.
3. Dublyansky Y., Kadebskaya O., Koltai G., Töchterle P., Spötl C. Cryogenic cave calcites reveal dynamic response of Eurasian permafrost to Late Pleistocene climate change // VIII International Workshop on Ice Caves, 11-16 June, 2018, Spain. – Potes, Picos de Europa, 2018. – P. 57.
4. Spotl, C., Vennemann, T.W. Continuous-flow isotope ratio mass spectrometric analysis of carbonate minerals // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. – 2003. – V. 17, № 9. – P. 1004-1006. DOI: 10.1002/rcm.1010.
5. Žak K., Onac B.P., Kadebskaya O.I., Filippi M., Dublyansky Y., Luetscher M. Cryogenic mineral formation in caves // *Ice Caves*. / ed. A. Persoiu, S.-E. Lauritzen. – Amsterdam: Elsevier, 2018 – Part 6. – P. 123-162. DOI: 10.1016/B978-0-12-811739-2.00035-8.

УДК 551.50

DOI: 10.7242/echo.2019.1.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В г. КУНГУРЕ В 2016-2018 гг.

А.С. КАЗАНЦЕВА

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Изотопный состав атмосферных осадков представляет собой важную исходную информацию для многочисленных исследований, в том числе и для гидрогеологических. 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.

Целью настоящих исследований стало изучение особенностей формирования изотопного состава атмосферных осадков на территории г. Кунгур. В статье представлены основные результаты исследований, полученные в период с декабря 2016 г. по июнь 2018 г. За основу принимается методический подход GNIP, в соответствии с которым измеряется изотопный состав проб, накопленных в течение месяца. Для сравнения проанализированы данные изотопного состава атмосферных осадков ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$), полученные Институтом водных ресурсов РАН в период с 1970 г. по 1990 г. для г. Перми.

По результатам исследований впервые получены данные концентраций стабильных изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках для г. Кунгура. Уточнена локальная линия метеорных вод, выделена корреляционная взаимосвязь между изотопным составом осадков и метеорологическими параметрами (температура воздуха и количество осадков). Также отражена широтная зональность изменения изотопного состава осадков по изотопным данным, полученным для г. Перми и г. Кунгура.

Поскольку существенную роль в формировании состава подземных вод играют атмосферные осадки, то эта информация служит основой для определения условий формирования изотопного состава подземных вод на исследуемой территории.

Ключевые слова: атмосферные осадки; изотопы кислорода и водорода; Кунгур.

Введение. На территории Пермского края изотопный состав осадков ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^3\text{H}$) изучался в 1970–1990 гг. только на территории г. Перми. В данной статье представлены предварительные результаты мониторинга изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) атмосферных осадков, проведенного на станции Кунгур с декабря 2016 г. по июнь 2018 г. В декабре 2016 г. для изучения состава атмосферных осадков на территории Кунгурской лаборатории-станции был установлен пробоотборник RS-1B (Palmex, Хорватия). Пробы накапливались в течение месяца в соответствии с рекомендациями GNIP¹. В конце каждого месяца проба сливалась из пробоотборника и помещалась в ёмкость для хранения. В зимнее время твердые

¹ IAEA/GNIP: IAEA/GNIP precipitation sampling guide (V2.02 September 2014), accessed at: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/gnip_manual_v2.02_en_hq.pdf on December 20, 2014.

осадки предварительно растапливались при комнатной температуре. Всего с декабря 2016 г. по июнь 2018 г. отобрано 19 проб атмосферных осадков. Для оценки метеорологических условий использовались данные метеостанции Meteoscan pro 923 (Termometerfabriken Viking AB, Швеция), установленной в точке отбора осадков на станции Кунгур. Использовались также данные погодного портала «Метеонести», представленные на сайте².

Методы исследования. Изотопный анализ кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) в пробах атмосферных осадков проводился в Инсбрукском университете (Австрия) на анализаторе L-2130-i (Picarro, США). Результаты обрабатывались статистически и нормализовались относительно стандарта V-SMOW. Аналитическая погрешность измерений составила $\pm 0,1\%$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 0,4\%$ для $\delta^2\text{H}$.

Закономерное распределение изотопного состава атмосферных осадков описывается уравнением $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ и называется глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ) или прямой Крейга [1, 2]. Данные по содержанию $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках, полученные за период исследования, представлены на графике относительно ГЛМВ (рис. 1), здесь же изображена локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ), рассчитанная для станции. Из расчетов исключили два значения (июнь, август 2017 г.), смещенных относительно ГЛМВ более чем на 1‰. Такое смещение указывает на возможное испарение пробы. Локальная линия метеорных вод для г. Кунгура описывается уравнением $\delta^2\text{H} = 7,8 \times \delta^{18}\text{O} + 5,1$.

Результаты исследования. Изотопный состав атмосферных осадков за период наблюдений изменялся в широком диапазоне и варьировал от $-8,5\%$ до $-26,8\%$, по $\delta^{18}\text{O}$, от $-58,0\%$ до $-197,7\%$ по $\delta^2\text{H}$. Наиболее легкий изотопный состав характерен для холодного сезона. В холодный период значения составили от $-14,9\%$ до $-26,8\%$ ($\delta^{18}\text{O}$) и от $-106,5\%$ до $-197,7\%$ ($\delta^2\text{H}$). В теплый период значения изотопного состава изменялись от $-8,5\%$ до $-14,2\%$ ($\delta^{18}\text{O}$) и от $-58,0\%$ до $-104,9\%$ ($\delta^2\text{H}$).

За 2017 г. по полному ряду наблюдений определены средневзвешенные значения дейтерия и кислорода-18 с учетом количества выпавших осадков. Они составили по $\delta^{18}\text{O} = -12,2\%$ и по $\delta^2\text{H} = -90,8\%$. Для сравнения были посчитаны средневзвешенные значения изотопного состава осадков по станции Пермь за 1982 г.: $\delta^{18}\text{O} = -12,9\%$ и $\delta^2\text{H} = -93,9\%$. Изменение средневзвешенных значений («утяжеление» в направлении с севера на юг) отражает широтную зональность изотопного состава осадков.

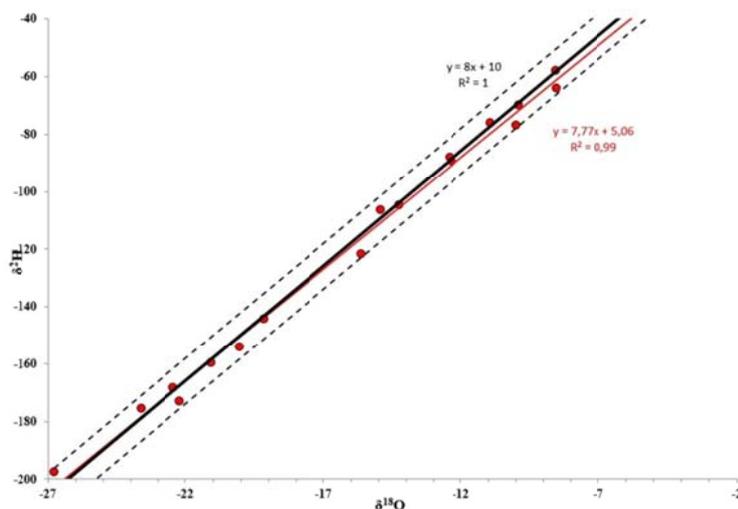


Рис. 1. Локальная линия метеорных вод для г. Кунгура. Штриховые линии ограничивают «коридор» $\pm 1\%$ $\delta^{18}\text{O}$, отражающий обычную вариабельность изотопных параметров атмосферных осадков

² <http://www.meteonovosti.ru>

На рисунке 2 представлен ход годового цикла замеров температуры воздуха, количества осадков и концентрации изотопов для станции Кунгур. На графике можно проследить взаимосвязь метеорологических параметров с изотопными характеристиками осадков. Определена корреляционная связь между параметрами и был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона (r). Корреляция определяется как очень сильная при $r > 0,8$, сильная при $r = 0,6-0,8$, умеренная при $r = 0,4-0,6$, слабая и очень слабая при $r < 0,4$ [3]. Для оценки значимости корреляции рассчитанные значения r сравнивались с критическими значениями, соответствующими уровню значимости $\alpha=0,05$ при числе степеней свободы $df = n-2$. Статистический анализ проводился только по изотопу водорода ($\delta^2\text{H}$), поскольку изотопный состав водорода и кислорода атмосферных осадков связан линейной зависимостью (табл. 1).

Корреляция между температурой и изотопным составом сильная и статистически значимая. Коэффициент детерминации $R^2=0,78$ говорит о том, что 78% вариальности изотопного состава можно объяснить вариальностью температуры. Корреляционная связь между температурой и количеством осадков существенная ($r = 0,69$). Статистически она значительна при $\alpha = 0,05$. Коэффициент детерминации $R^2=0,47$ говорит о том, что 47% вариальности осадков можно объяснить вариальностью температуры. Между количеством осадков и их изотопным составом корреляция слабая ($r = 0,48$) и статистически незначимая.

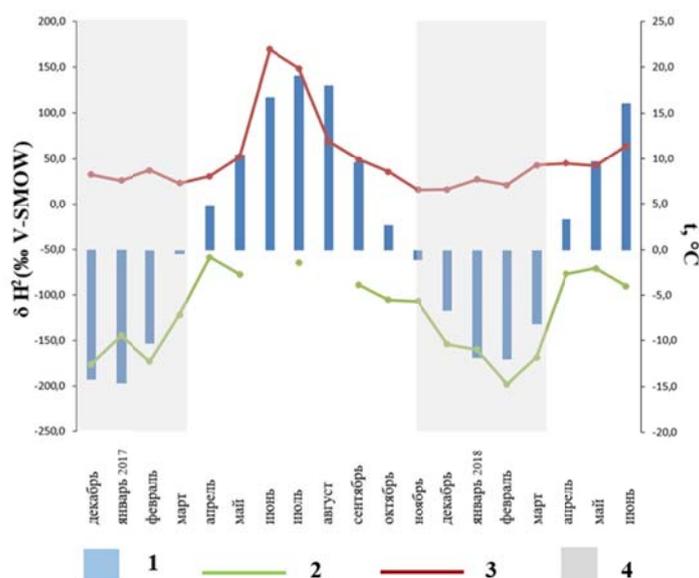


Рис. 2. Изменение изотопного состава водорода атмосферных осадков для станции Кунгур по месяцам (декабрь 2016 – июнь 2018): 1 – температура воздуха, 2 – изотопный состав осадков, 3 – количество выпавших осадков, 4 – холодный сезон

Таблица 1

Корреляция между изотопными характеристиками атмосферных осадков ($\delta^2\text{H}$), температурой (T) и количеством осадков (ppt) на станции Кунгур

| | $\delta^2\text{H}-T$ | Корреляция | $\delta^2\text{H}-\text{ppt}$ | Корреляция | $T-\text{ppt}$ | Корреляция |
|---------------------|----------------------|------------|-------------------------------|-------------|----------------|------------|
| Станция Кунгур | | | | | | |
| n = | 17 | | 17 | | 19 | |
| $r_{\text{crit}} =$ | 0,48 | | 0,48 | | 0,46 | |
| r = | 0,89 | значимая | 0,48 | критическая | 0,69 | значимая |
| $R^2 =$ | 0,78 | | 0,23 | | 0,47 | |

Примечания: n – количество измерений; r_{crit} – критическое значения коэффициента корреляции Пирсона для $\alpha=0,05$ при числе степеней свободы $df = n-2$; r - коэффициент корреляции Пирсона; R^2 – коэффициент детерминации.

Для сравнения были проанализированы все данные по станции Пермь с 1980 г. по 1990 г. (46 месяцев наблюдений) и установлено, что изотопный состав осадков демонстрирует сильную и очень сильную корреляцию с температурой воздуха ($r = 0,80$). Корреляция для станции Пермь немного слабее по сравнению со станцией Кунгур (17 месяцев наблюдений) и различие становится наиболее выраженным при корреляции между изотопным составом и количеством осадков. Для длинного ряда наблюдений станции Пермь корреляция очень слабая и статистически незначимая ($r = 0,07$), тогда как для станции Кунгур значимость имеет пограничное значение ($r = r_{crit}$). Такое различие может быть связано с аномальностью режима осадков в Пермском крае в 2017 г., когда их выпало около 140% от нормы.

Выводы. Полученные данные позволили впервые получить локальную линию метеорных вод для Кунгура. Средневзвешенные годовые значения изотопного состава осадков демонстрируют широтную зональность, снижаясь в направлении с юга на север. Короткий ряд наблюдений (19 месяцев) позволяет только предварительно оценить связь изотопного состава осадков с метеопараметрами (температурой и количеством осадков). Отмечается сильная корреляция между изотопным составом осадков и температурой воздуха. Около 80% вариации изотопного состава осадков в рамках годового хода определяется температурой воздуха. Количество осадков показывает умеренную корреляцию с изотопным составом осадков для короткой серии наблюдений на станции Кунгур. При этом корреляция отсутствует для длинной серии наблюдений на станции Пермь. Различие объясняется аномальным режимом осадков в Пермском крае в 2017 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-45-590369 «Исследование формирования изотопного и химического состава природных вод на территории Пермского края» (2017 г.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702-1703.
2. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. – 1964. – V. 16. – P. 436-468.
3. Evans J.D. Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences. – Pacific Grove: Brooks/Cole Publishing, 1996. – 600 p.

УДК 552.08

DOI: 10.7242/echo.2019.1.3

ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГОРНЫХ ПОРОД, СЛАГАЮЩИХ МАССИВ ЛЕДЯНОЙ ГОРЫ

А.В. КРАСИКОВ

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Исследование механических характеристик горных пород является актуальной задачей при прогнозе развития негативных процессов и обеспечения безопасности проведения горных работ на закарстованных территориях, какой и является массив Ледяной горы. Сложность данного прогноза может заключаться в том, что неоднородные по составу сульфатные и карбонатные породы будут менять механические свойства как по площади распространения, так и по мощности пластов. Кроме этого следует учитывать и воздействие на породы различных геологических процессов. В данной статье изложены результаты экспериментальных исследований прочностных и деформационных характеристик горных пород методом прямого опробования. Он заключается в испытании образцов, изготовленных из керна скважины и монолитов, отобранных из гротов Кунгурской ледяной пещеры. Для сульфатно-карбонатных пород массива впервые были определены основные механико-физические показатели, такие как предел прочности, модули деформации и упругости, коэффициент сцепления, угол внутреннего трения и др. Анализ полученных результатов позволил