

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 550.4

DOI:10.7242/echo.2023.2.1

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ НА ТЕРРИТОРИИ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ

А.С. Казанцева

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Приведены сводные данные изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) природных вод, в частности атмосферных осадков, поверхностных вод, естественных выходов подземных вод, воды из скважин гидрогеологической наблюдательной сети и рассолов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВМКМС). Материал собран по результатам исследований в разные периоды, начиная с 2011 г. по 2022 г.

Ключевые слова: Соликамская впадина, Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, изотопный состав, природные воды.

Введение

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей – одно из крупнейших месторождений калийных солей в России, территориально расположенное на севере Пермского края (Чердынский, Красновишерский, Соликамский, Усольский и Добрянский районы и территории, подчиненные городам Березники и Александровск), в структурном плане приуроченное к центральной части Соликамской впадины Предуралья Краевого прогиба. Мониторинг геологической среды в пределах ВМКМС, организованный в 1998 г., предусматривает усовершенствование научно-методического подхода в исследовании и определении генетических типов рассолов на рудниках ОАО «Уралкалий». Для этого с 2010-11 гг. различными предприятиями (ОАО «Галургия», ПГНИУ) выполнялись научно-исследовательские работы по апробации изотопных методов для определения генезиса рассолопроявлений. Информация об условиях формирования состава подземных вод на территории Верхнекамского месторождения необходима для повышения надежности заключений о степени опасности выявляемых рудничных рассолопроявлений.

Материалы и методы

В качестве фактического материала для исследования послужили метеорные воды (атмосферные осадки), отобранные на территории гг. Березники, Соликамска и п. Искор, воды поверхностного руслового стока, естественных выходов подземных вод в виде родников, а также подземные воды надсолевой толщи и рассолов из горных выработок ВМКМС на рудниках ОАО «Уралкалий» БКПРУ-1-4 и СКРУ-1-3. Опробование вод поверхностного стока, родников, вод из скважин, надсолевой толщи и рассолов проводили сотрудники геологической службы ОАО «Уралкалий», атмосферных осадков – сотрудники Кунгурской лаборатории-стационара «ГИ УрО РАН» [1-3, 6].

Изотопный анализ природных вод, рассмотренных в работе, выполнен в гидрохимической лаборатории кафедры геологии и гидрогеологии Пермского государственного национального исследовательского университета, Института геологии

Инсбрукского университета (Австрия) и Санкт-Петербургского государственного университета. Результаты обрабатывались статистически и нормализовались относительно стандарта V-SMOW. Средняя точность измерений $\delta^{18}\text{O}$ составила $\pm 0,1\%$, $\delta^2\text{H}$ – $\pm 0,4\%$.

Результаты и обсуждение

Атмосферные осадки. Изотопный облик подземных вод, так же, как и гидрохимический, подчиняется и формируется в зависимости от распределения изотопного состава атмосферных осадков. Атмосферные осадки являются основным источником питания подземных вод зоны активного водообмена, поверхностного стока, поэтому интерпретация данных об изотопном составе осадков является основой для понимания процессов формирования состава как подземных, так и поверхностных вод. На рисунке 1 приведены данные по распределению стабильных изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в атмосферных осадках на территории исследования.

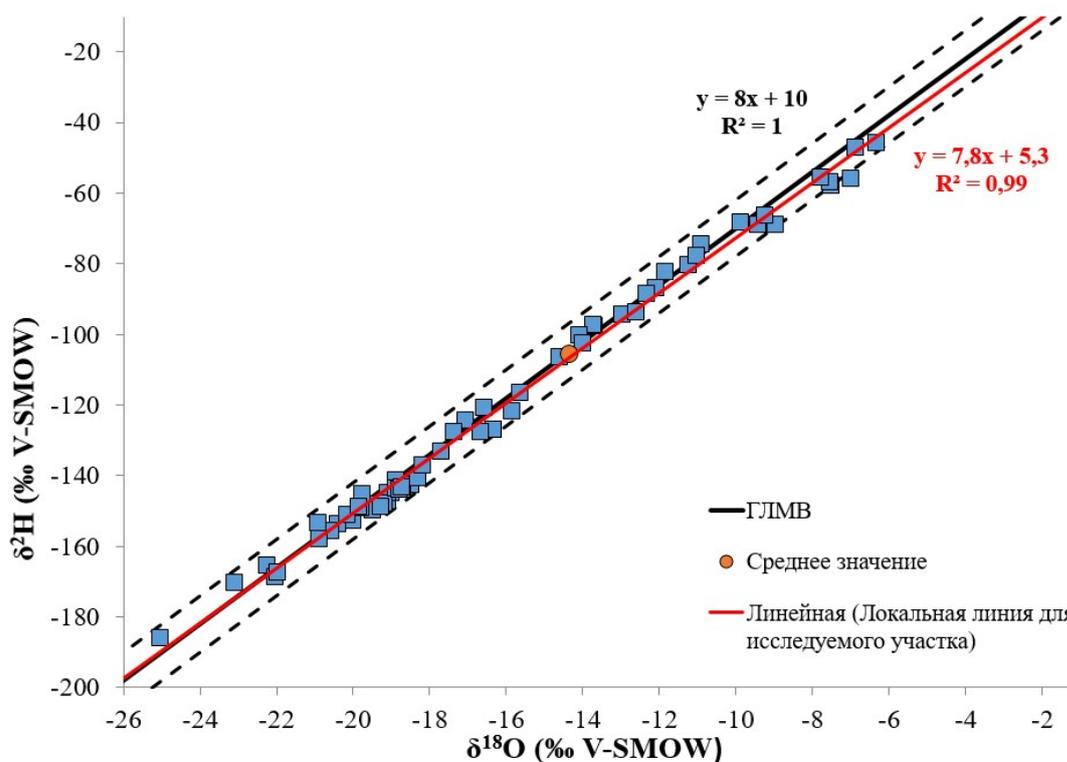


Рис. 1. Локальная линия метеорных вод для участка исследований.

Штриховые линии ограничивают «коридор» $\pm 1\%$ $\delta^{18}\text{O}$, отражающий обычную вариабельность изотопных параметров атмосферных осадков

На основании ряда наблюдений в 2013-22 гг. (51 проба) получена локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) для Соликамской впадины, имеющая вид $\delta^2\text{H} = 7,8 \times \delta^{18}\text{O} + 5,3$. По сравнению с глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ; линия Крейга; $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ [4]) ЛЛМВ характеризуется несколько меньшим угловым наклоном и водородным избытком. Изотопный состав атмосферных осадков изменяется в широких пределах $\delta^{18}\text{O} = -6,3..-25,1\%$, $\delta^2\text{H} = -45,7..-185,7\%$. Вариации значений $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в осадках в течение года закономерны [5]: наиболее «тяжелые» осадки выпадают в июле-августе (средние значения $\delta^{18}\text{O} \sim -8\%$, $\delta^2\text{H} \sim -58\%$), наиболее «легкие» – в декабре-феврале (средние значения $\delta^{18}\text{O} \sim -20\%$, $\delta^2\text{H} \sim -150\%$). С учетом имеющихся данных рассчитан

среднеарифметический изотопный состав атмосферных осадков $\delta^{18}\text{O} = -14,3\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -105,5\text{‰}$.

Поверхностные воды. Поверхностные воды являются важным компонентом гидрологического цикла и одним из факторов формирования состава подземных вод. Существенное значение имеют состав речных вод, а также характер взаимоотношения речных вод с подземными. В пределах ВМКМС опробованы и проанализированы воды поверхностного руслового стока из рек Макродойка, Суходойка, Поповка, Усолка, Черная, Зырянка, Ленва, Волим, Сылва, Коновалиха, Бушкашер, Селянка и некоторых ручьев. Отбор проб производился в весенний, летний и осенний периоды. Распределение стабильных изотопов в поверхностных водах приведено на рисунке 2.

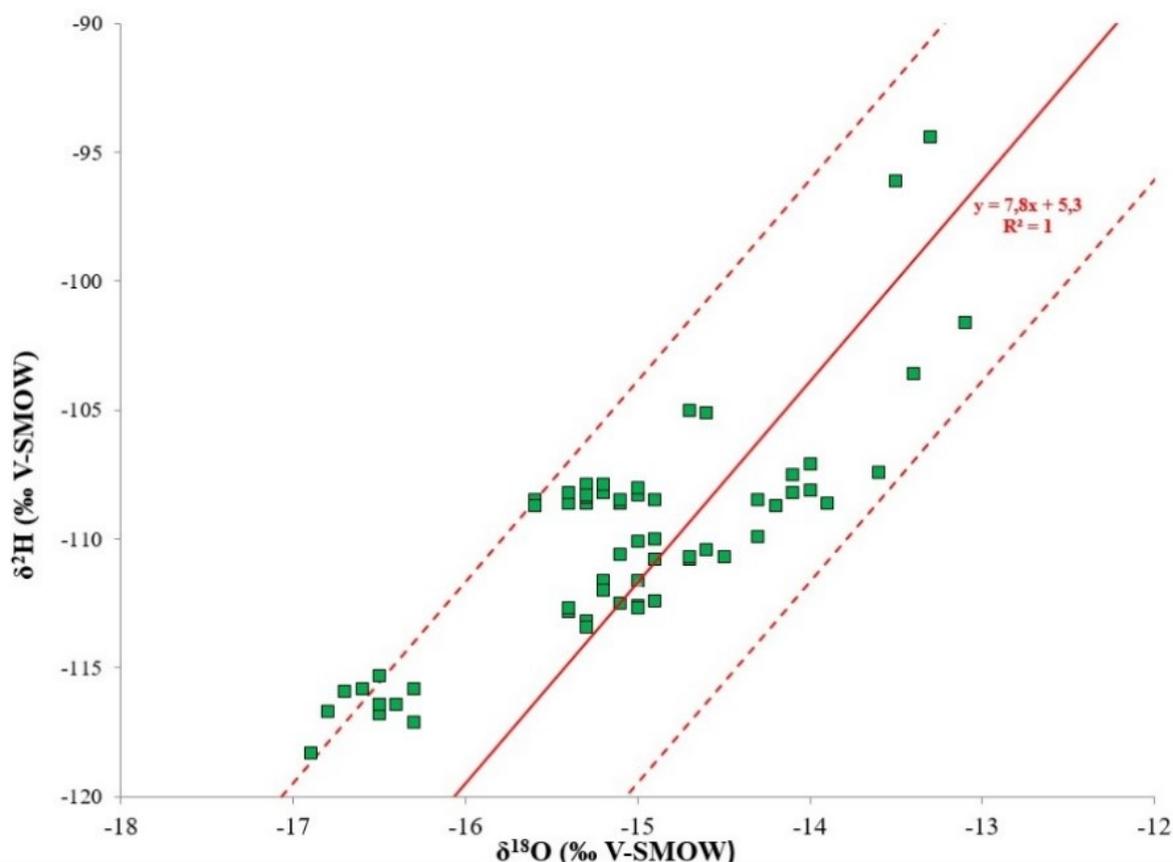


Рис. 2. Распределение стабильных изотопов в поверхностных водах в районе Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Сплошная красная линия – ЛЛМВ (см. рис. 1)

Изотопный состав поверхностных вод изменяется от $-13,1\text{‰}$ до $-16,9\text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$ и от $-94,4\text{‰}$ до $-118,3\text{‰}$ по $\delta^2\text{H}$ и демонстрирует закономерное для этих вод сезонное утяжеление изотопного состава в летне-осенний период. Также рассчитаны средние значения изотопного состава поверхностных вод: $\delta^{18}\text{O} \sim -15,1\text{‰}$, $\delta^2\text{H} \sim -110,1\text{‰}$, что несколько легче средних значений атмосферных осадков. Такое распределение указывает на преобладающую роль талых относительно изотопно «легких» вод в питании вод поверхностного руслового стока. Среди изученных водотоков реки Усолка и Суходойка имеют наиболее облегченный состав ($\delta^{18}\text{O} \sim -15,9\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \sim -112,0\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} \sim -15,8\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \sim -112,2\text{‰}$, средние значения со-

ответственно), р. Ленва – наиболее утяжеленный состав ($\delta^{18}\text{O} \sim -14,2\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \sim -105,9\text{‰}$). Химический состав исследованных поверхностных вод разнообразен, основные макрокомпоненты, входящие в состав вод – Na, Mg, Ca, HCO_3 и Cl, соответственно, минерализация вод изменяется в широком диапазоне (0,12-269 г/л). Повышенные значения минерализации свидетельствуют о разгрузке высокоминерализованных подземных вод в воды поверхностного стока. Отчетливой зависимости при изменении минерализации и изотопного состава в речных водах и ручьях не выявлено: несколько обеднены изотопами кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода ($\delta^2\text{H}$) солончатые (минерализация 1-10 г/л) поверхностные воды ($\delta^{18}\text{O} \sim -16,0\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \sim -112,5\text{‰}$).

Подземные воды. В пределах месторождения в весенний, летний и осенний периоды опробованы воды родникового стока и из наблюдательных и инженерно-геологических скважин, которые приурочены к разным отложениям: четвертичным, пестроцветной, терригенно-карбонатной и соляно-мергельной толще. Подземные воды из скважин имеют следующие изотопные характеристики (рис. 3): воды четвертичных отложений – $\delta^{18}\text{O} = -11,3\text{‰}..-17,2\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -95,7\text{‰}..-124,2\text{‰}$, воды пестроцветной толщи – $\delta^{18}\text{O} = -11,7\text{‰}..-16,5\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -94,4\text{‰}..-114,5\text{‰}$, воды терригенно-карбонатной толщи – $\delta^{18}\text{O} = -11,8\text{‰}..-17,3\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -100,6\text{‰}..-127,5\text{‰}$ и воды соляно-мергельной толщи – $\delta^{18}\text{O} = -10,2\text{‰}..-17,3\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -92,7\text{‰}..-119,1\text{‰}$. Для сравнения, изотопный состав вод родникового стока изменяется от $-12,4\text{‰}$ до $-17,5\text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$ и от $-92,3\text{‰}$ до $-118,1\text{‰}$ по $\delta^2\text{H}$.

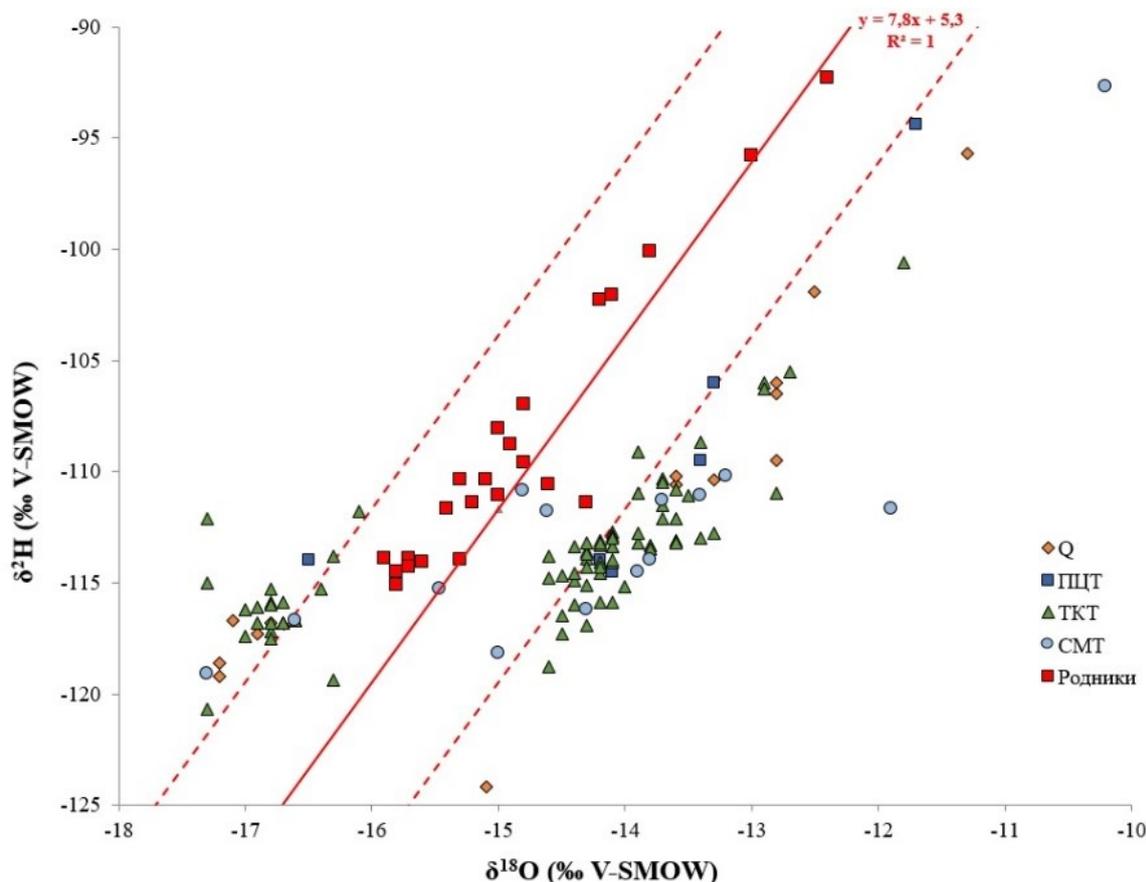


Рис. 3. Распределение стабильных изотопов в подземных водах в районе Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Сплошная красная линия – ЛЛМВ, Q – воды четвертичных отложений, ПЦТ – воды пестроцветной толщи, ТКТ – воды терригенно-карбонатной толщи, СМТ – воды соляно-мергельной толщи

Данные по естественным выходам подземных вод в координатах $\delta^{18}\text{O} \div \delta^2\text{H}$ хорошо согласуются с ЛЛМВ для района исследований. Уравнение, аппроксимирующее соотношение содержания $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в пробах воды, имеет вид: $\delta^2\text{H} = 6,6 \times \delta^{18}\text{O} - 10,8$ при достоверности аппроксимации $R^2 = 0,90$. То есть полученные значения изотопного состава родниковых вод указывают на их метеогенное происхождение. Что же касается подземных вод, отобранных из наблюдательных и инженерно-геологических скважин, то полученные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ несколько смещены влево и вправо относительно локальной линии метеорных вод. Для каждой группы скважинных вод прослежено сезонное изменение состава с облегчением в весенний период и утяжелением в летний. Это свидетельствует о разбавлении подземных вод разных толщ метеогенными водами. Воды пестроцветной толщи несколько обогащены тяжелыми изотопами водорода и кислорода ($\delta^{18}\text{O} \sim -13,9\%$, $\delta^2\text{H} \sim -108,7\%$), наиболее «легкий» состав имеют подземные воды терригенно-карбонатной толщи ($\delta^{18}\text{O} \sim -14,7\%$, $\delta^2\text{H} \sim -114,0\%$). Отмечена широтная зональность изменения изотопного состава вод, так, подземные воды, отобранные на территории Соликамских рудников (СКРУ) несколько легче по изотопному составу, чем воды, отобранные на территории Березниковских рудников (БКПРУ).

Подземные воды исследуемых скважин относятся к разным гидрогеологическим подразделениям, и минерализация вод изменяется от пресных (менее 1 г/л) к рассолам (более 35 г/л). В зависимости от изменения минерализации проанализированы изотопные изменения. Отчетливо выделяются пресные воды, которые имеют несколько облегченный состав вод: $\delta^{18}\text{O} \sim -15,2\%$, $\delta^2\text{H} \sim -114,8\%$. Установлена статистически значимая взаимосвязь между минерализацией и изотопным составом пресных вод ($r = 0,47-0,54$, при $r_{\text{crit}} = 0,31$ при $\alpha = 0,05$, $R^2 = 0,22-0,29$). Изотопные соотношения солоноватых (1-10 г/л), соленых (10-35 г/л) и рассольных (свыше 35 г/л) вод изменяются в узком диапазоне – $\delta^{18}\text{O} = -14,2..-14,3\%$, $\delta^2\text{H} = -111,9..-112,9\%$, и взаимосвязь между параметрами незначительная ($r = -0,04-0,08$).

Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в пробах воды скважин и родниковом стоке ($\delta^{18}\text{O} \sim -14,4\%$, $\delta^2\text{H} \sim -111,1\%$) соответствуют средним значениям стабильных изотопов атмосферных осадков ($\delta^{18}\text{O} \sim -14,3\%$, $\delta^2\text{H} \sim -105,5\%$), что предполагает их метеогенное происхождение. На это же и указывает сезонность изменения состава подземных вод. Но точную информацию о генезисе вод по имеющимся изотопным данным предоставить сложно, поскольку отсутствуют данные за зимний период.

Рассолы. Согласно «Руководству по ликвидации возможных рассолопроявлений в калийных рудниках ОАО «Уралкалий» (технологический регламент, 2011 г.)» выделена генетическая классификация рудничных рассолов: постседиментационные, конденсационные, закладочные и надсолевые воды и рассолы. Также различают смешанный постседиментационный и конденсационный, смешанный закладочный и конденсационный, смешанный закладочный и конденсационный, и смешанный закладочный и постседиментационный рассолы. Генетические типы выделены на основе их химического состава, но в то же время отсутствуют четкие критерии выделения того или иного генетического типа рассола только по гидрохимическим данным. Поэтому для каждого генетического типа рассолов произведен изотопный анализ для попытки идентификации их по соотношению $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в этих водах.

Рассолы опробованы на рудниках гг. Березники и Соликамск в разные периоды года. Изотопный состав рассолов контрастен по сравнению с изотопным составом подземных вод скважин: $\delta^{18}\text{O} = -1,9..-16,9\%$, $\delta^2\text{H} = -60,5..-115,7\%$ (рисунок 4), средние значения составляют для $\delta^{18}\text{O} \sim -10,9\%$, для $\delta^2\text{H} \sim -95,1\%$.

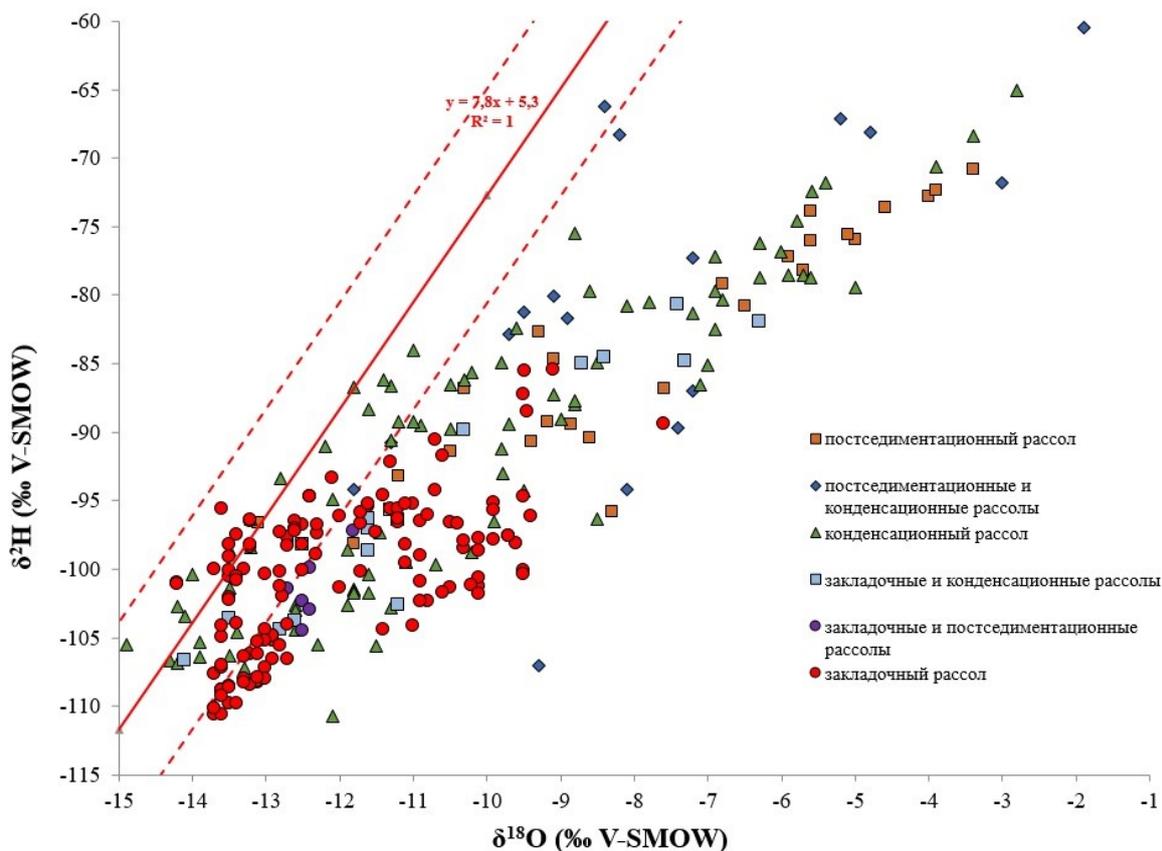


Рис. 4. Распределение стабильных изотопов в пробах рассолов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей. Сплошная красная линия – ЛЛМВ

Для каждого типа рассолов также определены средние содержания $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$: закладочные – $\delta^{18}\text{O}$ \sim -13,2‰, $\delta^2\text{H}$ \sim -105,7‰, постседиментационные – $\delta^{18}\text{O}$ \sim -7,8‰, $\delta^2\text{H}$ \sim -83,8‰, конденсационные – $\delta^{18}\text{O}$ \sim -10,2‰, $\delta^2\text{H}$ \sim -91,5‰, смешанный постседиментационный и конденсационный – $\delta^{18}\text{O}$ \sim -7,7‰, $\delta^2\text{H}$ \sim -80,5‰, смешанный закладочный и конденсационный – $\delta^{18}\text{O}$ \sim -12,3‰, $\delta^2\text{H}$ \sim -99,7‰, смешанный закладочный и конденсационный – $\delta^{18}\text{O}$ \sim -14,3‰, $\delta^2\text{H}$ \sim -105,5‰ и смешанный закладочный и постседиментационный – $\delta^{18}\text{O}$ \sim -12,4‰, $\delta^2\text{H}$ \sim -101,4‰. Как следует из рисунка 4 и полученных данных, основные генетические типы рассолов отличаются по содержанию кислорода-18 и дейтерия от промежуточных смешанных рассолов. Так, постседиментационные рассолы значительно отличаются и несколько «утяжелены» по составу, что связано с их морским происхождением. Отклонение точек от ЛЛМВ вправо и обогащение вод тяжелыми изотопами $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ указывает на морской генезис рассолов, а скопление точек вблизи ЛЛМВ – на формирование их местными атмосферными осадками. Промежуточное положение занимают рассольные воды, изотопный состав которых сформирован в результате смешения вод различных генетических типов. Минерализация изученных рассолов изменяется от 267,6 до 419,0 г/л.

Заключение

На основе исследований в период 2011-22 гг. получены новые данные по распределению стабильных изотопов в водах на территории Соликамской впадины. Получены вариации изменения изотопного состава в местных атмосферных осадках и установле-

на локальная линия метеорных вод для региона исследований, имеющая уравнение $\delta^2\text{H}=7,8\times\delta^{18}\text{O}+5,3$.

На основе изучения вод поверхностного руслового стока получены изотопные характеристики для некоторых рек, протекающих на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Поверхностные и подземные воды наблюдательных и инженерно-геологических скважин, а также естественные выходы вод Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей облегчены по изотопному составу и близки к локальным атмосферным осадкам. Несомненно, влияние обменных процессов, связанных с растворением пород, а также разгрузка подземных вод в поверхностные откладывает свой отпечаток на состав вод, на это указывает разнообразный химический состав и изменяющаяся минерализация вод от пресных до рассолов. Для исследуемых подземных вод характерно разбавление местными осадками, на это указывает и сезонность изменения изотопного состава вод. Если бы вода обогащалась тяжелым изотопом кислорода $\delta^{18}\text{O}$ только за счет изотопно-обменных процессов с растворенными и окружающими породами, которые богаты $\delta^{18}\text{O}$, то значения на диаграмме $\delta^{18}\text{O} \div \delta^2\text{H}$ были бы значительно смещены вправо.

Изотопный анализ рассольных вод позволил определить содержания $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ для основных генетических типов (постседиментационные, закладочные и конденсационные). Эти содержания отличны и контрастны по сравнению с надсолевой толщей. Некоторое «утяжеление» изотопного состава рассолов и отклонение от локальной линии метеорных вод указывает на их морской генезис и смешение вод различных генетических типов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
Министерства науки и образования РФ (рег. номер проекта 122012000400-0).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казанцева А.С. Изотопно-геохимические особенности формирования состава подземных вод в нижнепермских отложениях карстовых районов Среднего Предуралья: дис. ... к. г.-м. н. 1.6.6. / Казанцева Алена Сергеевна. – Москва, 2022. – 151 с.: ил.
2. Казанцева А.С. Изотопный состав атмосферных осадков Северного Урала на территории Пермского края // Инициатива в образовании: проблема интерпретации знания в современной науке: сб. науч. тр. – Казань, 2019. – С. 278-280.
3. Казанцева А.С., Кадебская О.И., Дублянский Ю.В., Катаев В.Н. Результаты мониторинга изотопного состава атмосферных осадков на территории Северного и Среднего Урала // Метеорология и гидрология. – 2020. – №. 3 – С. 87-94.
4. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702-1703.
5. Gat J.R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle // Annual Review of Earth and Planetetary Science. – 1996. – V. 24. P. 225-262.
6. Kazantseva A. S., Kadebskaya O. I., Dublyansky Yu. V. Isotopic Composition of Atmospheric Precipitation in the Cis-Ural Region. Journal of Earth Science, 2022, 33(3): 831-838. doi: 10.1007/s12583-021-1429-8.