ДИНАМИКА ИЗОТОПОВ ^2H И ^{18}O В ВОДАХ ТИПИЧНОГО МАЛОГО РЕЧНОГО БАССЕЙНА (ЮЖНЫЙ СИХОТЭ-АЛИНЬ, ПРИМОРСКИЙ КРАЙ, РФ)

Шамов В.В.¹, Токарев И.В.², Михайлик Т.А.¹, Козачек А.В.³

¹Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, E-mail: vatsuro@gmail.com

²Ресурсный центр «Геомодель» СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, E-mail: tokarevigor@gmail.com

³Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия, E-mail: kozachek@aari.ru

АННОТАЦИЯ: Анализируются новые детальные данные о содержании изотопов ^{18}O и ^2H в основных типах вод типичных малых горных водосборов Приморья в летне-осенний период года. Во влажные годы воды континентальных районов в среднем легче по изотопному составу в сравнении с районами побережья приблизительно в 1,5 раза. Для прибрежно-морских водосборов почвенные воды в изотопном отношении почти неразличимы, для континентальных водосборов лизиметрические воды близки в этом смысле к речным водам, а склоновые грунтовые воды имеют более легкий состав. Близкие значения изотопов в почвенных и речных водах обоих районов указывают на определяющую долю склоновых вод в питании малых рек и, соответственно, низкие значения долей базисного стока (подземного питания) и дождевых вод.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изменения изотопного состава природной воды рассматриваются как индикатор приуроченности воды различным звеньям гидрологического цикла [8, 3 и др.]. Наиболее существенным является изменение изотопного состава воды как в процессе испарения с поверхности океана и других водных поверхностей, так и в обратном процессе конденсации при формировании атмосферных осадков. В связи с этим в метеорных водах уменьшается количество тяжёлых изотопов водорода и кислорода по сравнению с океаническими водами, вода озёр, растений, почв, где доля испарения (транспирации) в общем водном балансе велика, относительно богаты такими изотопами. При прохождении через водоносные горизонты при неизменной окружающей температуре подземные воды характеризуются устойчивым изотопным составом (при её повышении взаимодействие с горными породами может привести к изменению изотопного состава воды). Отмеченные изменения состава изотопов в атмосферных, поверхностных, почвенных и грунтовых водах, в растениях применяются для характеристики гидрологических систем и процессов.

К настоящему времени отрывочные данные о содержании природных изотопов в водах ландшафтов юга Дальнего Востока России получены хабаровскими гидрогеологами [2], а также специалистами Дальневосточного отделения РАН [4, 5]. Анализ межсезонной динамики изотопов ^2H и ^{18}O в основных географических типах вод горных речных бассейнов региона приводится впервые.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках программы натурных исследований механизмов стокоформирования на репрезентативных малых речных водосборах в южной части горной страны Сихотэ-Алинь в тёплые периоды 2013-2016 годов были массово отобраны 348 нефильтрованных проб дождевой, почвенной и речной воды для последующего их анализа на содержание изотопов $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$. Пробы отбирались в пластиковую и стеклянную посуду объемом от 2 до 10 мл с последующей герметизацией и хранением при температуре от 0 до +14°C.

Один из районов исследований представляет собой часть территории Верхнеуссурийского биоценологического стационара Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН. Стационар расположен в бассейне р. Правой Соколовки в верховьях р. Уссури и включает экспериментальные малые речные водосборы, типичные для природы южного Сихотэ-Алиня. Ландшафтное описание данного района приводится в ряде публикаций [6]. Второй район исследований удален от первого района на расстоянии 160 км и расположен близ побережья Японского моря и примыкает к экспедиционной базе "Смычка" Тихоокеанского института географии ДВО РАН (пос. Смычка Приморского края РФ). Данный район в ландшафтном отношении характеризует восточный макросклон южного Сихотэ-Алиня. Описание условий района можно найти в нашей публикации [11].

Анализ изотопного состава образцов 2013 года выполнялся на лазерном анализаторе изотопного состава воды Picarro L2120-i в Лаборатории

изменений климата и окружающей среды (ЛИ-КОС) Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Каждый образец измерялся один раз, через каждые пять измерений образцов выполнялись измерения рабочего стандарта лаборатории, близкого по изотопному составу к значениям анализируемых образцов. Некоторые случайно выбранные образцы (10 % общего числа) для контроля качества измерений обрабатывались дважды. Воспроизводимость результатов составила 0,06 ‰ для ^{18}O и 0,30 ‰ для ^2H . В 2014 году анализ проб воды выполнен в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН на лазерном анализаторе Picarro L-2130-i. При этом использовались стандарты МАГАТЭ. Воспроизводимость измерений, определенная путем повторного измерения проб, оказалась равной 0,04 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0,5 ‰ для δD . В 2015 и 2016 гг. пробы

анализировались в Ресурсном центре "Геомодель" (Научный парк СПбГУ) на лазерном анализаторе воды Picarro L-2120-i. Неопределенность измерений составляет $\pm 0,12$ ‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 1,3$ ‰ по δD , использованы стандарты V-SMOW-2, GISP и LASP, USGS45 и USGS46. Осредненные данные представлены в форме отклонения доли от VSMOWL в ‰ (табл. 1 и 2).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из полученных данных следует, что водосборы, расположенные вблизи морского побережья (бассейн р. Падь Васькова) отличаются более тяжёлым изотопным составом вод речных и склоновых грунтовых потоков, а также почвенных/лизиметрических вод в сравнении с континентальными водосборами (бассейн р. Прав. Соколовки).

Таблица 1. Аппроксимация связи $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в природных водах малых водосборов Приморья

Характеристика проб воды	Уравнение регрессии $\delta^2\text{H} = f(\delta^{18}\text{O})$, ‰	R^2
GMWL – Глобальная линия метеорных вод	$y = 8x + 10$	-
RMWL – Региональная линия метеорных вод (Харитонов и др., 2012)	$Y \sim 8x$	-
р. Падь Васькова		
Дождь	$y = 5,9801x - 9,1329$	0.997
Река, болото	$y = 5,2374x - 20,204$	0.442
Почва (лизиметрические воды)	$y = 2,5441x - 45,014$	0.506
Склоновые грунтовые потоки	$y = 6,7515x - 2,4115$	0.298
р. Правая Соколовка, верховья		
Дождь, подкroновые воды	$y = 6,8095x - 4,8503$	0.966
Река	$y = 6,8145x - 5,8068$	0.565
Почва (лизиметрические воды)	$y = 5,343x - 26,711$	0.640
Склоновые грунтовые потоки	$y = 3,9105x - 47,757$	0.195

Таблица 2. Осредненные показатели $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в природных водах малых водосборов Приморья

Речные воды $\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	Речные воды $\delta^2\text{H}$, ‰ SMOW	Склоновые грунтовые и родниковые воды $\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	Склоновые грунтовые и родниковые воды $\delta^2\text{H}$, ‰ SMOW	Лизиметрические воды $\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	Лизиметрические воды $\delta^2\text{H}$, ‰ SMOW	Атмосферные воды $\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	Атмосферные воды $\delta^2\text{H}$, ‰ SMOW
р. Правая Соколовка, верховья							
-14,36	-103,66	-14,75	-105,45	-14,30	-103,10	-8,05	-59,67
р. Падь Васькова							
-10,29	-74,08	-10,13	-70,81	-10,08	-70,67	-6,667	-49

Такой факт известен [3] и связывается с фракционированием изотопного состава воды в процессе многократных циклов испарения-конденсации у поверхности суши, а также с вероятным влиянием испарения с морской поверхности на состав вод прибрежных районов.

Изотопный состав дождевых и подкroновых (собранных под древесным пологом) вод в обоих указанных районах отличается большим разбросом на фоне сравнительно небольшой выборки и, как следствие, невысокой статистической надёжности, хотя нужно отметить, что в среднем изотопный состав

атмосферных вод тяжелее по отношению к почвенным и речным/склоновым водам. В относительно более сухие 2013 и 2014 гг. содержание изотопов ^{18}O и ^2H в почвенных водах верховьев р. Правой Соколовки испытывают больший диапазон колебаний и несколько выше в сравнении с пробами более влажных 2015 и 2016 гг.

Изменение наклона прямой, аппроксимирующей связь $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, указывает на возрастание ^{18}O при одном и том же уровне ^2H в почвенных водах по сравнению с метеорными водами. Наклон меняется в пределах одного района при переходе от проб атмосферных вод к почвенным и водам склоновых предпочтительных путей стекания. Обогащение подземных вод изотопом ^{18}O может быть обусловлено обменными процессами воды с подстилающими силикатными породами при агрессивном воздействии на них углекислоты [1]. Для почвенных вод континентальных районов возрастание доли тяжелых изотопов кислорода может быть связано, в первую очередь, с процессами испарения, при которых молекулы воды, включающие ^{16}O , легче и, следовательно, улетучиваются в атмосферу в относительно большем объеме, чем молекулы с ^{18}O [7, 9].

В зависимости от соотношения долей дождевых и почвенных вод в объеме речного стока меняется изотопный состав речных проб, отобранных в период формирования дождевого паводка. При этом сильно изменяется амплитуда и направленность колебания данного состава как от паводка к паводку, так и в процессе одного паводкового цикла, что указывает на сложность генетической структуры паводочного стока, очевидно, заметно меняющейся от одной фазы паводка к другой. Основной объем среднего по силе дождевого паводка сопровождается обычно в целом снижением количества тяжелых изотопов в речных пробах (например, $\delta^{18}\text{O}$ – от -11 до -14 ‰).

Во время многодневной летней межени, когда может наблюдаться квантование слоя стокообразования даже на реках II порядка, в пробах из первичных водотоков $\delta^{18}\text{O}$ возрастает от -13,5 до -10 ‰, что, очевидно, связано с доминированием в это время на водосборах процессов эвапотранспирации. Данное утяжеление изотопного состава, по некоторым данным для рек I порядка, бывает более значительным, чем таковое, вызванное поступ-

лением в речные потоки дождевых вод ($\delta^{18}\text{O}$ – от -14 до -12 ‰). В осеннюю межень – к концу сентября – началу октября – приток тепла сокращается, вегетация прекращается, испарение существенно уменьшается, изотопный состав при этом практически мало отличим от состава речных вод, отобранных в период прохождения паводка и отражающих приток преобладающего в речном стоке объема склоновых/почвенных вод.

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, для водосборов, расположенных вблизи морского побережья, характерен более тяжелый изотопный состав дождевых, речных и почвенных вод. Атмосферные воды в пределах исследованных районов не имеют тенденции образовывать непересекающиеся группы. Воды континентальных горных районов Приморья по изотопному составу в целом легче в сравнении с районами побережья приблизительно в 1,5 раза, вероятно, в связи с влиянием на состав вод прибрежных водосборов процессов испарения с морской поверхности. Для "морских" водосборов лизиметрические воды и воды приповерхностных склоновых предпочтительных водопроводящих путей в изотопном отношении практически неразличимы, тогда как для континентальных водосборов лизиметрические воды близки в этом смысле к речным водам, а склоновые – отличаются чуть более легким изотопным составом. Изотопный состав речных вод испытывает сложную неоднозначную динамику в процессе развития дождевого паводка, отражая изменения генетической структуры паводочного стока. В целом близкие значения долей природных изотопов в почвенных и речных водах обоих районов указывают на определяющую долю склоновых вод в питании малых рек района и, соответственно, низкие значения долей базисного стока (подземного питания) и дождевых вод.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-05-00541а, 16-05-00182а, 17-05-00217а) и комплексной программы ФАНО Дальний Восток (проекты 15-1-6-089, 18-5-09)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветштейн В.Е. Изотопы кислорода и водорода природных вод СССР. – Л.: Недра, 1982. – 216 с.
2. Труфанов А.И., Иванов В.Г., Караванов К.П., Кислицын Л.В. Дейтерий и процессы формирования

природных вод юга Дальнего Востока // Ресурсы и химический состав природных вод Дальнего Востока / Вопросы географии Дальнего Востока. – Сб. пятнадцатый. – Хабаровск: Книжное изд-во, 1975. – С. 129-136.

3. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.

4. Харитонов Н.А., Челноков Г.А., Брагин И.В., Вах Е.А. Изотопный состав природных вод юга Дальнего Востока России // Тихоокеанская геология. – Т. 31. – № 2. – 2012. – С. 75-86.

5. Чудаева В.А., Чудаев О.В., Юрченко С.Г. Химический и изотопный ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и $\text{D}/^1\text{H}$) состав грунтовых вод некоторых районов Приморья // Тихоокеанская геология. – Т. 27. – № 6. – 2008. – С. 57-64.

6. Boldeskul A.G., Shamov V.V., Gartsman B.I., Kozhevnikova N.K., Gubareva T.S., Lutsenko T.N. Chemical composition of geographical types of the small river basin waters (Central Sikhote-Alin Mountains, Pacific Asia) // Water Resources. – Vol. 43. – No 1. – 2016. – P. 112-124.

7. Klaus J., McDonnell J.J., Jackson C.R., Du E., Griffiths N.A. Where does streamwater come from in low-relief forested watersheds? A dual-isotope approach // Hydrol. Earth Syst. Sci. – No 19. – 2015. – P. 125-135.

9. Gat J.R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. – No 24. – 1996. – P. 225-62.

10. Moravec B.G., Keller C.K., Smith J.L., Allen-King R.M., Goodwin A.J., Fairley J.P., Larson P.B. Oxygen-18 dynamics in precipitation and streamflow in a semi-arid agricultural watershed, Eastern Washington, USA // Hydrol. Process. – No 24. – 2010. – P. 446-460.

11. Sánchez-Murillo R., Brooks E.S., Elliot W.J., Boll J. Isotope hydrology and baseflow geochemistry in natural and human-altered watersheds in the Inland Pacific Northwest, USA // Isotopes in Environmental and Health Studies. – 2015. – <http://dx.doi.org/10.1080/10256016.2015.1008468>.

12. Shamov V., Gartsman B., Shekman E., Gubareva T., Tarbeeva A., Lupakov S., Chelnokov G., Kozhevnikova N., Burdukovskiy M., and Orlyakovskiy A. Tracer studies of preferential water flow paths in mountain slopes, Pacific Russia // Proc. 21st International Northern Research Basins Symposium and Workshop. – Yakutsk, Russia, August 6–12, 2017. – Melnikov Permafrost Institute SB RAS Publ. – 2017. – P. 113-122.

^2H AND ^{18}O DYNAMICS IN WATER FROM TYPICAL MOUNTAIN CATCHMENTS (SOUTHERN SIKHOTE-ALIN MOUNTAINS, PRIMORSKIY REGION, PACIFIC RUSSIA)

Shamov V.V.¹, Tokarev I.V.², Mikhailik T.A.¹, Kozachek A.V.³

¹*Pacific Institute of Geography FEB RAS, Vladivostok, Russia, E-mail: vatsuro@gmail.com*

²*Center for Geo-Environmental Research and Modelling (GEOMODEL), Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia, E-mail: tokarevigor@gmail.com*

³*State Research Center "Arctic and Antarctic Research Institute", Saint-Petersburg, Russia, E-mail: kozachek@aari.ru*

ABSTRACT: New detailed data on ^{18}O и ^2H in principal near-surficial water cycle chains at representative small catchments in the south part of Sikhote-Alin Mountains (Pacific Russia) during warm period of year are given. It is found the seashore catchments have the heavier isotope composition of atmospheric, river and soil water. Supposedly, according to results obtained, in quite humid years the water in continental mountain areas of Primorye has less ^{18}O и ^2H against seashore landscapes approximately in 1.5 times. Soil (lysimetric) water samples and water samples from slope sub-surface preferential flow paths from seashore catchments are almost indistinguishable whereas ^{18}O и ^2H in lysimetric and river samples from continental catchments are close, but samples from slope preferential flow paths have easier isotope composition. Totally, close ^{18}O и ^2H values in soil and river samples from the both areas point to the biggest share of slope water in integral river flow at small catchments there, and, accordingly, low share of underground and rain water inflow.