

УДК 550.42 (571.6)

DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.202

**ДИНАМИКА ИЗОТОПНОГО
СОСТАВА (^2H , ^{18}O) ВОД МАЛЫХ
РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ЮЖНОГО
СИХОТЭ-АЛИНЯ В ЛЕТНЕ-
ОСЕННИЙ ПЕРИОД**В.В. Шамов¹, И.В. Токарев²,
Т.А. Михайлик³, А.В. Козачек⁴

¹Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
г. Владивосток, Россия; ²Ресурсный центр
«Рентгено-дифракционные методы
исследования», Научный парк СПбГУ,
г. Санкт-Петербург, Россия; ³Тихоокеанский
океанологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, Россия; ⁴Арктический и
Антарктический научно-исследовательский
институт, г. Санкт-Петербург, Россия
vlshamov@yandex.ru

**SUMMER-AUTUMN VARIABILITY
OF ISOTOPES (^2H AND ^{18}O) IN
WATER AT SMALL MOUNTAIN
CATCHMENTS IN SOUTH
SIKHOTE-ALIN (PACIFIC RUSSIA)**Vladimir V. Shamov¹, Igor V. Tokarev²,
Tatyana A. Mikhailik³, Anna V. Kozachek⁴
¹Pacific Institute of Geography FEB RAS,
Vladivostok, Russia; ²Facility Centre for Roentgen
and Diffraction Methods of Investigation, Saint-
Petersburg State University, Saint-Petersburg,
Russia; ³V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute
FEB RAS, Vladivostok, Russia; ⁴State Research
Center "Arctic and Antarctic Research Institute",
Saint-Petersburg, Russia

vlshamov@yandex.ru

Аннотация. Изотопный состав природной воды отражает ее приуроченность к различным звеньям гидрологического цикла, изменяясь в процессе фазовых переходов (испарения, транспирации, конденсации, замерзания, оттаивания), а также при взаимодействии воды с водовмещающими средами (горными породами, почвами, воздушными массами, биотой). В статье впервые на основе детальных натуральных исследований, выполненных в период с 2013 по 2016 год в экспериментальных малых горных речных бассейнах, анализируется внутригодовая и межгодовая динамика содержания изотопов ^2H и ^{18}O в основных географических типах вод, циркулирующих в летне-осенний период в типичных речных бассейнах горной страны Сихотэ-Алинь (Приморский край Российской Федерации). Показано, что для малых речных бассейнов вблизи морского побережья характерен более тяжелый изотопный состав дождевых, речных и почвенных вод. Обосновывается предварительный вывод о том, что в относительно влажные годы воды континентальных горных районов Приморья по изотопному составу в среднем легче в сравнении

Abstract. The isotopic composition of natural water reflects its confinement to various links of the hydrological cycle, changing during phase transitions (evaporation, transpiration, condensation, freezing, thawing), as well as during the interaction of water with water-containing media (rocks, soils, air masses, biota, etc.). In the article, for the first time based on detailed field studies in the testbed small mountain river basins in 2013–2016, the intra-annual and inter-annual dynamics of the ^2H and ^{18}O isotopes in the main geographical types of water circulating in warm period in typical river basins of the mountainous country of Sikhote-Alin (Primorsky Krai, Russian Federation) are analyzed. We show that rain, river and soil waters at the catchments near the seacoast have a heavier isotopic composition. A preliminary conclusion is substantiated that in relatively humid years, the waters of the continental mountainous regions of Primorye are, on average, lighter in isotopic composition than those in the coastal regions by about 1.5 times. For coastal-marine river catchments, soil water and water of near-surface slope flows are almost indistinguishable in isotope ratio, while for continental catchments, soil water are close in ^{18}O and ^2H to river water, and

Shamov V.V., Tokarev I.V., Mikhailik T.A., Kozachek A.V. Summer-autumn variability of isotopes (^2H and ^{18}O) in water at small mountain catchments in South Sikhote-Alin (Pacific Russia). *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2022, vol. 4, iss. 2, pp. 202–215. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.34753/HS.2022.4.2.202](https://doi.org/10.34753/HS.2022.4.2.202).

с районами побережья приблизительно в 1,5 раза. Для речных водосборов, расположенных прибрежно-морских районах, почвенные воды и воды устойчивых приповерхностных склоновых потоков в изотопном отношении почти неразличимы, тогда как для континентальных водосборов почвенные воды близки по содержанию ^{18}O и ^2H к речным водам, а воды склоновых потоков отличаются чуть более легким, чем речные воды, изотопным составом. В целом близкие значения природных изотопов в почвенных и речных водах обоих районов подтверждают полученные ранее с помощью природных химических трассеров выводы о в целом преобладающей доли склоновых вод – почвенных вод и вод приповерхностных склоновых потоков – в питании малых горных рек Сихотэ-Алиня и, соответственно, относительно невысокий объем подземного питания и низкие значения доли дождевых вод в речном стоке.

Ключевые слова: влагооборот; изотопный состав; ^{18}O ; ^2H ; атмосферные, почвенные и речные воды; Дальний Восток России.

Введение

Изотопный состав природной воды уже давно рассматривается как индикатор ее приуроченности к различным звеньям гидрологического цикла [Gat, 1996; Aggrawal, Gat, Froehlich, 2005; Ферронский, Поляков, 2009; Sánchez-Murillo et al., 2015]. Наиболее существенным здесь является изменение изотопного состава воды как в процессе испарения с поверхности океана и других водных поверхностей, так и в процессе конденсации пара в атмосфере. Как результат, в метеорных (атмосферных) водах уменьшается количество тяжелых изотопов водорода и кислорода по сравнению с океаническими водами, при этом воды таких объектов, как озера, растения, почвы, где доля испарения (эвапотранспирации) в водном балансе велика, относительно обогащены такими изотопами. При прохождении через водоносные горизонты при неизменной окружающей температуре подземные воды

slope water differ in a slightly lighter isotopic composition. In general, close values of natural isotopes in soil and river water of the both studied areas confirm the conclusion obtained with natural chemical tracers about the prevailing total share of slope water – soil water and water of near-surface slope flows – in the feeding of small mountain rivers in the Sikhote-Alin mountains and, accordingly, relatively low groundwater recharge and low values of the share of rainwater in river flow.

Keywords: water cycle; isotopes; ^{18}O ; ^2H ; atmospheric, soil and river water; Pacific Russia.

характеризуются устойчивым изотопным составом; при повышении температуры взаимодействие воды с горными породами может привести к изменению ее изотопного состава. Отмеченные изменения в содержании изотопов в атмосферных, поверхностных, почвенных и грунтовых водах, а также в биоте применяются для характеристики процессов водообмена в речных бассейнах.

К настоящему времени имеются отрывочные данные о содержании природных изотопов в континентальных и морских водах Тихоокеанской России [Труфанов и др., 1975; Чудаева, Чудаев, Юрченко, 2008; Харитонов и др., 2012; Chelnokov et al., 2013; Харитонов и др., 2017]. Внутригодовая и межгодовая динамика изотопов ^2H и ^{18}O в основных географических типах вод, циркулирующих в пределах горных речных бассейнов данного региона, анализируется впервые.



Рисунок 1. Схема расположения районов исследований (пояснения в тексте).

Figure 1. The layout of study area.

Характеристика районов исследований

В рамках программы натуральных исследований формирования стока в процессе детальных гидролого-гидрохимических наблюдений на репрезентативных малых речных водосборах в южной части горной страны Сихотэ-Алинь пробы дождевой, почвенной и речной воды были массово исследованы на относительное содержание стабильных изотопов $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$.

Один из районов исследований – условно названный континентальным – представляет собой часть территории Верхнеуссурийского биоценологического стационара Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Северо-восточной Азии Дальневосточного отделения Российской академии наук. Стационар расположен в бассейне реки Правая Соколовка в верховьях реки Усури (рисунок 1). В пределах его границ находятся три экспериментальных речных водосбора, на которых проводились наблюдения.

Данный речной бассейн находится в пределах Самаркинской подзоны Центральной структурно-формационной зоны Самаркинского террейна [Ханчук и др., 1995]. Наиболее молодые отложения, мощность которых достигает 600–650 м, представлены здесь в основном позднемеловыми эффузивами кислого состава. Верхняя трещиноватая зона, обусловленная процессами выветривания, прослеживается до глубины 30 м в долинах и более – на водоразделах. Глубже трещиноватость связана с разломами. Район относится к Сихотэ-Алинскому гидрогеологическому массиву, где широко распространены трещинные и трещинно-жильные подземные воды.

Рассматриваемая территория типична для среднегорного пояса Южного Сихотэ-Алиня и служит своеобразным эталоном южной тайги с господством широколиственно-кедровых и пихтово-еловых лесов. В диапазоне высот от 500 до 800–900 м над уровнем моря на аллювиальных отложениях распространены горно-долинные, а на склоновом делювии – горнолесные бурые почвы. В поясе высот от 800 до 1100 м под пихтово-еловыми лесами на

элювиальных и элювиально-делювиальных отложениях вершин водоразделов и склонов гор развиты буротаежные иллювиально-гумусовые группы типов почв. Высокая скелетность почв, рыхлое их сложение и крутые склоны способствуют интенсивному подповерхностному стоку [Boldeskul et al., 2016].

Климат рассматриваемого района влажный умеренно-холодный. Средняя годовая температура воздуха составляет плюс $0,7^{\circ}\text{C}$, с абсолютным максимумом (плюс 38°C) в июле-августе и абсолютным минимумом (минус 45°C) в январе. За год выпадает в среднем 780 мм осадков, более 80% из них – с апреля по октябрь. Максимальные суточные суммы осадков (до 200 мм) обусловлены выходом тропических циклонов во второй половине лета. Устойчивый снежный покров образуется в ноябре. Высота снежного покрова составляет 52–102 см при запасах воды в снеге 96–205 мм. Сезонная мерзлота в почве сохраняется в среднем в течение 206 дней, глубина промерзания в разные годы достигает 53–125 см [Кожевникова и др., 2014].

Второй район исследований представляет собой водосбор реки Падь Васькова, примыкающий к устьевому участку реки Рудная близ побережья Японского моря (Приморский край Российской Федерации) (рисунок 1). Данный район характеризует восточный макросклон южного Сихотэ-Алиня и расположен в пределах одной из крупных структурно-фациальных зон – Прибрежного антиклинория или Таухинского террейна [Ханчук и др., 1995]. Основная часть данной территории в геологическом отношении представлена эффузивами, интрузивами и вулканогенно-осадочными образованиями верхнего мела и палеогена. Эффузивы представлены комплексами пород среднего и кислого состава (кварцевые порфириды и риолиты, их лавы и туфы), интрузивные разности – гранитоидами палеогена [Аржанова, Елпатьевский, 1990].

По типу современного горного рельефа данный район представляет собой эрозионно-денудационные низкогорья с высотами до 539 м над уровнем моря (гора Камни) и субмеридиональным простиранием основных

водоразделов. Рельеф преимущественно крутосклонный, сильно расчлененный с амплитудой относительных превышений до 200–250 м и средними уклонами $5\text{--}20^{\circ}$. Низкогорные элювиальные отложения представлены щебнисто-суглинистой фацией мощностью до 1–3 м и грубого механического состава. Склоновые отложения сложены в основном делювиальной, а также щебнисто-суглинистой фацией, реже осыпной и обвальной фациями. По гребням водоразделов, реже по склонам, встречаются выходы коренных пород. Речные долины достигают ширины 3–4 км, в них хорошо развиты высокая и низкая поймы, локально встречаются надпойменные террасы. Русловая фация представлена валунно-галечниковым материалом, пойменная – суглинками, супесями, песками.

Высокая щебнистость почвенного профиля обеспечивает высокую скважность и свободную инфильтрацию атмосферных осадков, при этом в условиях сильно расчлененного рельефа почвы элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов испытывают лишь кратковременное переувлажнение [Аржанова, Елпатьевский, 1990]. На горных склонах в рыхлых отложениях на глубине 0,5–1,0 м встречаются невыраженные или слабо выраженные водные потоки, которые представляют собой устойчивые формы концентрации склонового стока [Тарбеева, Гарцман, 2017; Гарцман и др., 2020]. Во время обильных дождей эти потоки достигают силы, достаточной для пересортировки и выноса вниз по склону рыхлого материала и формирования первичных ложбин, хорошо врезанных в склон.

Климат прибрежного района исследований влажный умеренно-холодный муссонный с высокой степенью континентальности. Среднемесячная температура самого холодного месяца в году – января – составляет минус $12,9^{\circ}\text{C}$, самого теплого – августа – плюс $18,4^{\circ}\text{C}$. Годовая сумма осадков колеблется в пределах 600–850 мм. Для первой половины теплого периода характерны туманы, затяжные морозящие дожди малой интенсивности, снижение эффективной солнечной радиации до 50–60% от потенциальной. Для второй половины (июль –

сентябрь) типичны осадки ливневого характера с интенсивностью от 30 до 120 мм/сут.

Исходный материал и методы

Отбор проб воды производился в октябре 2013 года и в июне–сентябре 2014, 2015 и 2016 годов. Пробы помещались в пластиковую или стеклянную посуду объемом от 2 до 10 мл с последующей герметизацией и хранением при температуре от 0 до +14°C.

В результате массовых отборов признаны по условиям хранения надежными 348 нефилтрованных проб дождевых, почвенных (извлеченных с помощью вакуумных лизиметров с керамическими наконечниками) и речных вод для последующего их анализа на содержание природных изотопов – ^{18}O и $^2\text{H}(\text{D})$.

Анализ изотопного состава образцов, отобранных в 2013 году, выполнялся на лазерном анализаторе изотопного состава воды Picarro L2120-ⁱ в Лаборатории изменений климата и окружающей среды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. Каждый образец измерялся один раз, через каждые пять измерений образцов выполнялись измерения рабочего стандарта лаборатории, близкого по изотопному составу к значениям измеряемых образцов. Некоторые случайно выбранные образцы (10% общего числа) для контроля качества измерений обрабатывались дважды. Воспроизводимость результатов составила 0,06‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0,30‰ для $\delta^2\text{H}$.

Пробы воды, отобранные в 2014 году, обрабатывались в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН на лазерном анализаторе Picarro L-2130-ⁱ. При этом в качестве рабочих стандартов использовались стандарты МАГАТЭ. Воспроизводимость измерений, определенная путем повторного измерения проб, оказалась равной 0,04‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0,5‰ для $\delta^2\text{H}$. В 2015 и 2016 годах анализ проб производился на лазерном анализаторе воды Picarro L-2120-ⁱ в Ресурсном центре «Геомодель»

(Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета). Неопределенность измерений составила $\pm 0,12\%$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 1,3\%$ по $\delta^2\text{H}$, при этом в качестве рабочих стандартов использовались стандарты V-SMOW-2, GISP и LASP, USGS45 и USGS46.

Данные анализа представлены в форме отклонения доли от SMOW в промилле (‰).

Результаты и обсуждение

Обобщенные данные исследований приведены в таблицах 1 и 2, а также на рисунках 2–4.

Из их анализа следует, что водосборы, расположенные вблизи морского побережья (бассейн реки Падь Васькова), отличаются заметно более тяжелым изотопным составом речных вод, вод приповерхностных склоновых потоков, а также почвенных вод в сравнении с континентальными водосборами Приморья (бассейн реки Правая Соколовка). Это связано с фракционирующим влиянием интенсивных процессов испарения и конденсации над поверхностью моря на изотопный состав вод прибрежных районов и подтверждается региональными данными, приведенными в [Ферронский, Поляков, 2009].

Изотопный состав дождевых и подкрановых (собранных под древесным пологом) вод в обоих районах при сравнительно небольшой выборке отличается большим разбросом и, как следствие, невысокой статистической надежностью. При этом изотопный состав атмосферных вод в среднем тяжелее по отношению к почвенным, а также речным и склоновым (приуроченных к предпочтительным путям стекания) водам. В относительно более сухие 2013 и 2014 годы содержание изотопов ^{18}O и ^2H в почвенных водах верховьев реки Правая Соколовка, в силу в среднем большего влияния испарения, испытывают больший диапазон колебаний и несколько выше в сравнении с пробами более влажных лет – 2015 и 2016 годов.

¹ PICARRO L2120-ⁱ $\delta\text{D}/\delta^{18}\text{O}$ Isotopic Water Analyzer. 2012. URL: <https://www.picarro.com/sites/default/files/L2120-i%20Datasheet.pdf>.

Таблица 1. Осредненные показатели $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в пробах природных вод малых речных бассейнов южного Сихотэ-Алиня.

Table 1. Averaged values of $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ in natural water samples from small stream catchments of the south Sikhote-Alin.

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	Почвенные воды $\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	Почвенные воды $\delta^2\text{H}$, ‰ SMOW	Атмосферные воды $\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	Атмосферные воды $\delta^2\text{H}$, ‰ SMOW
река Правая Соколовка, верховья N 44°02', E 134°12'							
-14,36	-103,66	-14,75	-105,45	-14,30	-103,10	-8,05	-59,67
река Падь Васькова N 44°20', E 135°47'							
-10,29	-74,08	-10,13	-70,81	-10,08	-70,67	-6,667	-49

Таблица 2. Аппроксимация связи $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для вод малых речных бассейнов южного Сихотэ-Алиня.

Table 2. Approximation of $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ relation in the water sampled from small stream catchments of the south Sikhote-Alin.

Характеристика проб воды	Уравнение регрессии $\delta^2\text{H} = f(\delta^{18}\text{O})$, ‰	Коэффициент детерминации, R^2
GMWL – Глобальная линия метеорных вод	$y = 8x + 10$	—
RMWL – Региональная линия метеорных вод [Ферронский, Поляков, 2009]	$Y \sim 8x$	—
река Правая Соколовка, верховья		
Дождь, подкroновые воды	$y = 6,8095x - 4,8503$	0,966
Река	$y = 6,8145x - 5,8068$	0,565
Почвенные воды	$y = 5,343x - 26,711$	0,640
Склоновые грунтовые потоки	$y = 3,9105x - 47,757$	0,195
река Падь Васькова		
Дождь	$y = 5,9801x - 9,1329$	0,997
Река, болото в верховьях	$y = 5,2374x - 20,204$	0,442
Почвенные воды	$y = 2,5441x - 45,014$	0,506
Склоновые грунтовые потоки	$y = 6,7515x - 2,4115$	0,298

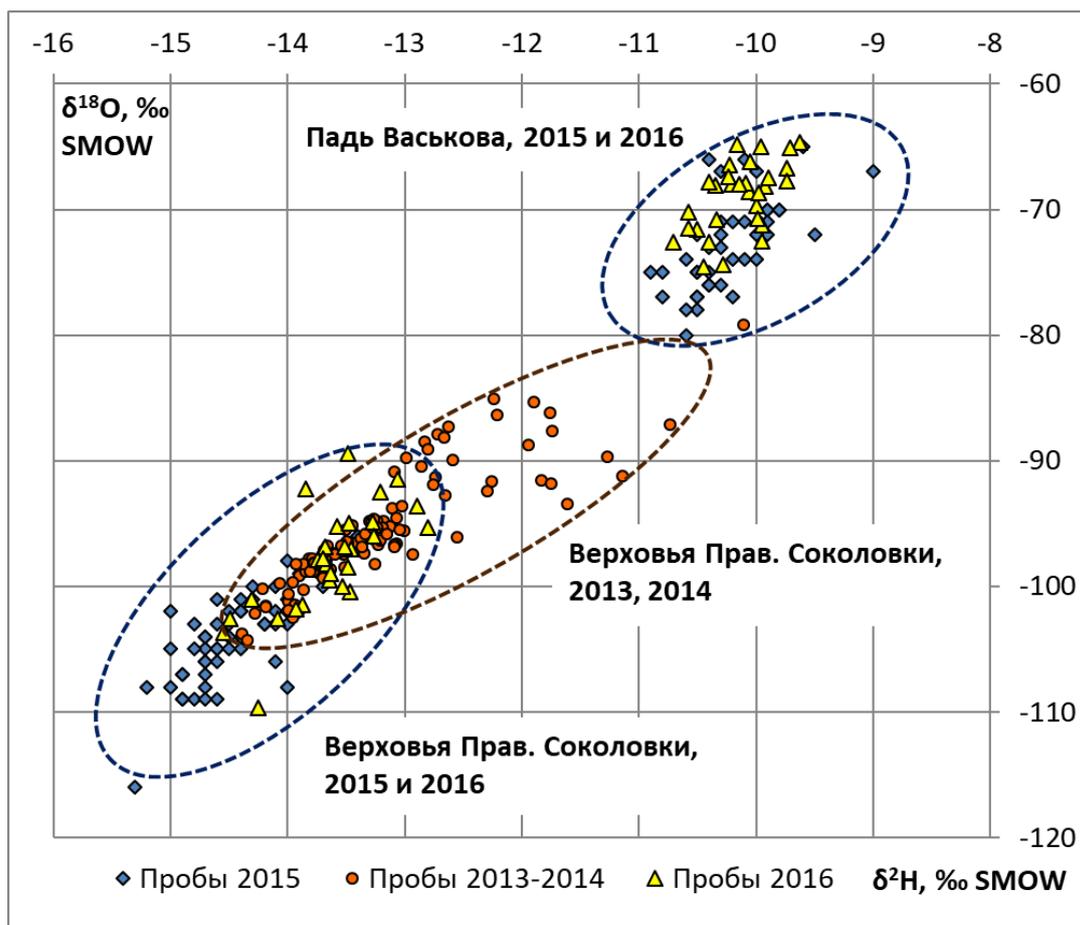


Рисунок 2. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в пробах речных вод в бассейнах рек Правая Соколовка и Падь Васькова.

Figure 2. The $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ relation in the stream water sampled from the Pravaya Sokolovka River and Pad' Vas'kova River.

Изменение наклона прямой, аппроксимирующей связь $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, указывает на возрастание содержания ^{18}O при одном и том же уровне ^2H в почвенных водах по сравнению с дождевыми водами (рисунок 3). Наклон меняется в пределах одного района при переходе от проб атмосферных вод к почвенным и склоновым водам. Обогащение подземных вод изотопом ^{18}O , скорее всего, обусловлено обменными процессами воды с подстилающими силикатными породами при агрессивном воздействии на них углекислоты [Ветштейн, 1982] и, вероятно, органических кислот, в достаточном количестве присутствующих в почвенных растворах.

Для почвенных вод континентального района возрастание доли тяжелых изотопов кислорода может быть обусловлено в первую очередь процессами активного физиологического испарения (транспирации) во время вегетации. На юге Сихотэ-Алиня в жаркие сухие дни транспирация по объему в среднем превосходит сток в 5–6 раз [Лупаков и др., 2021]. С испарением связано изотопное фракционирование, при котором молекулы воды, включающие изотоп ^{16}O , легче и, следовательно, улетучиваются в атмосферу в относительно большем объеме, чем молекулы с изотопом ^{18}O [Moravec et al., 2010; Klaus et al., 2015].

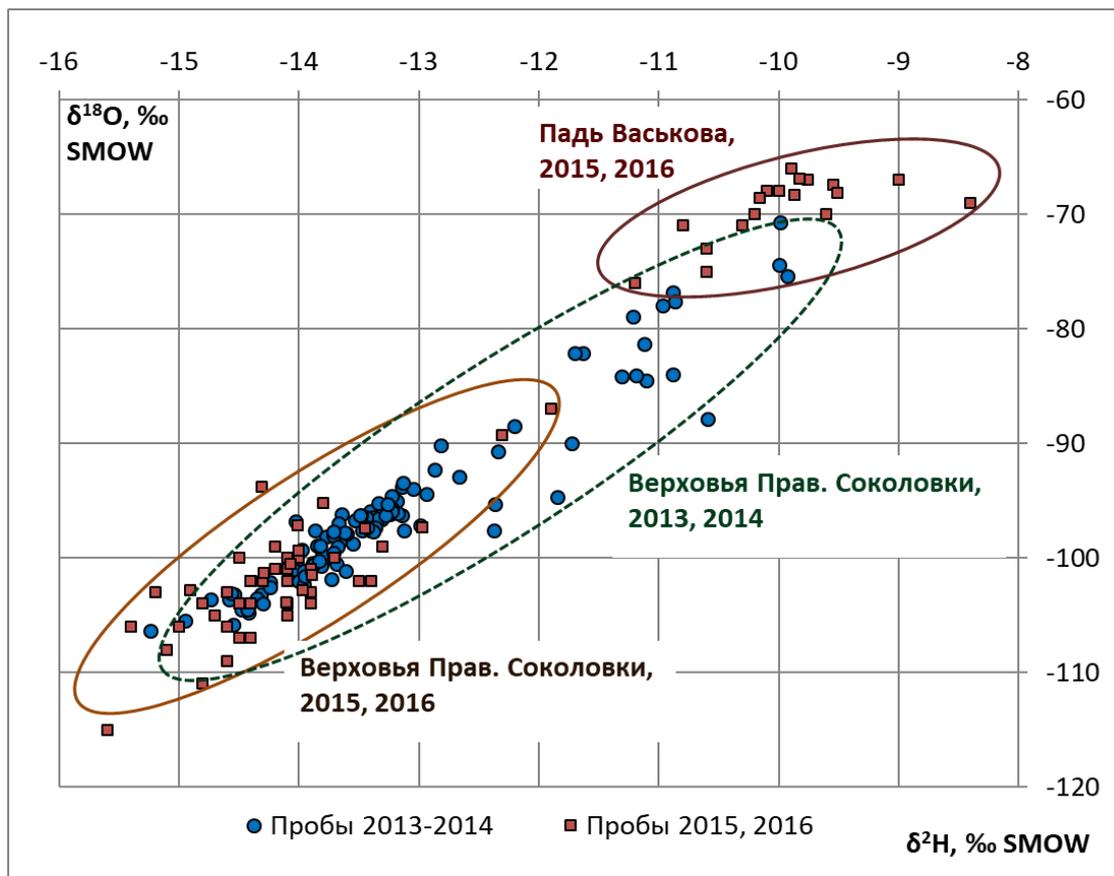


Рисунок 3. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в пробах почвенных вод в бассейнах рек Правая Соколовка и Падь Васькова.

Figure 3. The $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ relation in the soil (lysimetric) water sampled from the Pravaya Sokolovka River and Pad' Vas'kova River.

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 пределах одного паводкового цикла, что указывает на сложность генетической структуры паводочного руслового стока, заметно меняющейся даже на непродолжительных интервалах времени [Губарева и др., 2019].

Основной объем среднего по силе дождевого паводка сопровождается обычно общим снижением количества тяжелых изотопов в речных пробах (например, $\delta^{18}\text{O}$ – от -11 до -14‰), очевидно, вследствие высокой доли почвенных вод (склоновых подповерхностных вод) в объеме паводкового стока [Губарева и др., 2019], более легких по изотопному составу,

а также на фоне снижения интенсивности испарения с водосбора в период формирования паводка.

Во время длительной летней межени, которая нередко сопровождается полным истощением руслового стока даже на некоторых мелководных участках рек II порядка, в пробах из первичных водотоков содержание $\delta^{18}\text{O}$ возрастает от -13,5 до -10‰, что, очевидно, можно объяснить доминированием на водосборах процессов эвапотранспирации и связанного с ними изотопного фракционирования. Данное утяжеление изотопного состава, по некоторым данным для рек I порядка, бывает более значительным, чем таковое, вызванное выпадением на в русла их водосборов обогащенных изотопами дождевых вод, вызванных морскими циклонами ($\delta^{18}\text{O}$ – от -14 до -12‰).

исследованных районов в отличие от речных и почвенных вод не образуют непересекающиеся группы по изотопному составу. Для водосборов, расположенных вблизи морского побережья, почвенные воды и воды склоновых предпочтительных водопроводящих путей в изотопном отношении практически неразличимы, тогда как для континентальных водосборов почвенные воды в этом смысле близки к речным

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы № 122020900184-5 Государственного задания в части научно-исследовательской работы Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения Российской академии наук на период с 2019 по 2021 год при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 17-05-00217, 19-05-00326).

Авторы выражают благодарность д.г.н. Б.И. Гарцману, к.г.н. Т.С. Губаревой, к.б.н. Н.К. Кожевниковой, к.г.н. С.Ю. Лупакову, Е.А. Шекману и Д.А. Касурову за активное участие в отборах проб воды.

Литература

Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 194 с.

Ветштейн В.Е. Изотопы кислорода и водорода природных вод СССР. Л.: Недра, 1982. 216 с.

Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Орляковский А.В., Тарбеева А.М., Шапов В.В., Шекман Е.А. Формы линейной организации склонового стока в среднегорье (на примере Сихотэ-Алиня) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 123–132. DOI: [10.31857/S0321059620020042](https://doi.org/10.31857/S0321059620020042).

Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шапов В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Лупаков С.Ю. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // Известия Российской академии наук. Серия географическая.

водам, а склоновые – отличаются более легким изотопным составом. В целом близкие значения долей природных изотопов в почвенных и речных водах водосборов в обоих районах исследований отражают определяющую в среднем долю неглубоких почвенных вод в питании малых рек района и, соответственно, низкие значения долей базисного стока (подземного питания) и поверхностных (дождевых) вод в речном стоке.

Acknowledgments

The work was carried out within the framework of topic No. 122020900184-5 of the State Assignment in terms of research of the Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences for 2019–2021 with the financial support of the RFBR (projects No. 17-05-00217 and 19-05-00326).

The authors are grateful to DSc. B.I. Gartsman, Ph.D. T.S. Gubareva, Ph.D. N.K. Kozhevnikova, Ph.D. S.Yu. Lupakov, E.A. Shekman and D.A. Kasurov for active participation in water sampling.

References

Aggrawal P.K., Gat J.R., Froehlich K.F.O. *Isotopes in the water cycle: past, present and future of a developing science*. Netherlands, Springer, IAEA, 2005. 381 p.

Arzhanova V.S., Elpat'evskii P.V. *Geokhimiya landshaftov i tekhnogenez. [Geochemistry of landscapes and technogenesis]*. Moscow, Publ. Nauka, 1990. 194 p. (In Russian).

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*, 2016, vol. 43, iss. 1, pp. 145–157. DOI: [10.1134/S0097807816010048](https://doi.org/10.1134/S0097807816010048).

Chelnokov G., Kharitionova N., Bragin I., Vasil'eva M. Deuterium, oxygen-18 and tritium in precipitation, surface and groundwater in the Far East of Russia. *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Water-Rock*

2019. № 6. С. 126–140.

DOI: [10.31857/S2587-556620196126-140](https://doi.org/10.31857/S2587-556620196126-140).

Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г., Шамов В.В., Гарцман Б.И., Губарева Т.С. Особенности формирования химического состава природных вод в горных лесных бассейнах // 6-ая конференция «Чтения памяти В.Я. Леванидова» (г. Владивосток, Россия, 19 – 21 марта 2014 года). Владивосток: Дальнаука, 2014. № 6. С. 316–323.

Лунаков С.Ю., Губарева Т.С., Шамов В.В., Рубцов А.В., Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Омелько А.М. Возможности использования данных о стволовом сокодвижении в гидрологическом моделировании // Тихоокеанская география. 2021. № 2 (6). С. 54–64. DOI: [10.35735/tig.2021.6.2.005](https://doi.org/10.35735/tig.2021.6.2.005).

Тарбеева А.М., Гарцман Б.И. Морфогенез первичных звеньев гидрографической сети: натурные исследования в центральном Сихотэ-Алине // География и природные ресурсы. 2017. № 4. С. 114–121. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2017-4\(114-121\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(114-121)).

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 / Под ред. А.И. Ивлева / Вопросы географии Дальнего Востока. Сборник 15. Хабаровск: Хабаровский комплексный научно-исследовательский институт, 1975. С. 129–136.

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

Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д., Голозубов В.В., Гонохова Н.Г. Геология и полезные ископаемые Приморского края: очерк. Владивосток: Дальнаука, 1995. 68 с.

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

Харитоновна Н.А., Шварцев С.Л., Лепокурова О.Е., Челноков Г.А. Уникальные

Interaction, WRI 14 (9-14 June 2013, Avignon, France), 2013, vol. 7, pp. 151–154. DOI: [10.1016/j.proeps.2013.03.209](https://doi.org/10.1016/j.proeps.2013.03.209).

Chudaeva V.A., Yurchenko S.G., Chudaev O.V. Chemical and isotopic ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $\text{D}/^1\text{H}$) composition of groundwaters of central and southern Primorye. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2008, vol. 2, iss. 6, pp. 512–520. DOI: [10.1134/S1819714008060055](https://doi.org/10.1134/S1819714008060055). (Russ. ed.: Chudaeva V.A., Chudaev O.V., Yurchenko S.G. Khimicheskii i izotopnyi ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ i $\text{D}/^1\text{H}$) sostav gruntovykh vod tsentral'nogo i yuzhnogo Primor'ya. *Tikhookeanskaya geologiya*, 2008, vol. 27, iss. 6, pp. 57–64).

Ferronskii V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery Zemli [Isotopy of the Earth's hydrosphere]*. Moscow, Publ. Nauchnyi mir, 2009. 632 p. (In Russian).

Gartsman B.I., Gubareva T.S., Lupakov S.Y., Shamov V.V., Shekman E.A., Orlyakovskii A.V., Tarbeeva A.M. The forms of linear structure of overland flow in medium-height mountain regions: case study of the Sikhote Alin. *Water Resources*, 2020, vol. 47, iss. 2, pp. 179–188. DOI: [10.1134/S0097807820020049](https://doi.org/10.1134/S0097807820020049). (Russ. ed.: Gartsman B.I., Gubareva T.S., Lupakov S.Yu., Orlyakovskii A.V., Tarbeeva A.M., Shamov V.V., Shekman E.A. Formy lineinoi organizatsii sklonovogo stoka v srednegor'e (na primere Sikhote-Alinya). *Vodnye resursy*, 2020, vol. 47, iss. 2, pp. 123–132. DOI: [10.31857/S0321059620020042](https://doi.org/10.31857/S0321059620020042)).

Gat J.R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, vol. 24, pp. 225–262. DOI: [10.1146/annurev.earth.24.1.225](https://doi.org/10.1146/annurev.earth.24.1.225).

Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Lutsenko T.N., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K., Lupakov S.Yu. Komponenty stoka malykh vodosborov Sikhote-Alinya: obobshchenie rezul'tatov polevykh izmerenii i trassernogo modelirovaniya [Runoff components of small catchments in Sikhote-Alin: summarizing the results of field measurements and tracer modeling]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya [Izvestiya Rossiiskoi Akademii*

углекислые минеральные воды месторождения Мухен (Хабаровский край): состав и генезис // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475. № 6. С. 685–690. DOI: [10.7868/S0869565217240185](https://doi.org/10.7868/S0869565217240185).

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 центрального и южного Приморья // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 6. С. 57–64.

Aggrawal P.K., Gat J.R., Froehlich K.F.O. Isotopes in the water cycle: past, present and future of a developing science. Netherlands: Springer, IAEA, 2005. 381 p.

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. 2016. Vol. 43. № 1. P. 145–157. DOI: [10.1134/S0097807816010048](https://doi.org/10.1134/S0097807816010048).

Chelnokov G., Kharitonova N., Bragin I., Vasil'eva M. Deuterium, oxygen-18 and tritium in precipitation, surface and groundwater in the Far East of Russia // Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Water-Rock Interaction, WRI 14 (9-14 June 2013, Avignon, France). 2013. Vol. 7. P. 151–154. DOI: [10.1016/j.proeps.2013.03.209](https://doi.org/10.1016/j.proeps.2013.03.209).

Gat J.R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1996. Vol. 24. P. 225–262. DOI: [10.1146/annurev.earth.24.1.225](https://doi.org/10.1146/annurev.earth.24.1.225).

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 // Hydrology and Earth System Sciences. 2015. Vol. 19. № 1. P. 125–135. DOI: [10.5194/hess-19-125-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-125-2015).

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 // Hydrological Processes. 2010. Vol. 24. № 4. P. 446–460. DOI: [10.1002/hyp.7515](https://doi.org/10.1002/hyp.7515).

Nauk. Geographic series], 2019, iss. 6, pp. 126–140. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.31857/S2587-556620196126-140](https://doi.org/10.31857/S2587-556620196126-140).

Khanchuk A.I., Ratkin V.V., Ryazantseva M.D., Golozubov V.V., Gonokhova N.G. *Geologiya i poleznye iskopaemye Primorskogo kraja: ocherk [Geology and minerals of Primorsky Krai: an essay]*. Vladivostok, Publ. Dal'nauka, 1995. 68 p. (In Russian).

Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Vakh E.A. Izotopnyi sostav prirodnykh vod yuga Dal'nego Vostoka Rossii [Isotope composition of natural waters of the southern Far East, Russia]. *Tikhookeanskaya geologiya [Russian Journal of Pacific Geology]*, 2012, vol. 31, iss. 2, pp. 75–86. (In Russian; abstract in English).

Kharitonova N.A., Shvartsev S.L., Lepokurova O.E., Chelnokov G.A. Unique CO_2 -saturated mineral waters of the Mukhen deposit (Khabarovsk Krai): Composition and genesis. *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 475, iss. 2, pp. 953–957. DOI: [10.1134/S1028334X17080220](https://doi.org/10.1134/S1028334X17080220). (Russ. ed.: Kharitonova N.A., Shvartsev S.L., Lepokurova O.E., Chelnokov G.A. Unikal'nye uglekislye mineral'nye vody mestorozhdeniya Mukhen (Khabarovskii kraï): sostav i genезis. *Doklady Akademii nauk*, 2017, vol. 475, iss. 6, pp. 685–690. DOI: [10.7868/S0869565217240185](https://doi.org/10.7868/S0869565217240185)).

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. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, vol. 19, iss. 1, pp. 125–135. DOI: [10.5194/hess-19-125-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-125-2015).

Kozhevnikova N.K., Boldeskul A.G., Shamov V.V., Gartsman B.I., Gubareva T.S. *Osobennosti formirovaniya khimicheskogo sostava prirodnykh vod v gornykh lesnykh basseynakh [Features of the formation of the chemical composition of natural waters in mountain forest basins]*. *Materialy 6-oi konferentsii «Chteniya pamyati V.Ya. Levanidova» (Vladivostok, Rossiya, 19 – 21 marta 2014) [Proceedings of Vladimir Ya.L. Biennial Memorial Meetings. Vol. 6 (Vladivostok, Russia, March, 19–21, 2014)]*. Vladivostok, Publ. Dal'nauka, 2014, pp. 316–323. (In Russian).

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. Vol. 51. № 2. P. 1–24. DOI: [10.1080/10256016.2015.1008468](https://doi.org/10.1080/10256016.2015.1008468).

Lupakov S.Yu., Gubareva T.S., Shamov V.V., Rubtsov A.V., Gartsman B.I., Bugaets A.N., Omelko A.M. Vozmozhnosti ispol'zovaniya dannykh o stvolovom sokodvizhenii v gidrologicheskom modelirovanii [Aplicability of sap flow data in hydrological modeling]. *Tikhookeanskaya geografiya [Pacific Geography Journal]*, 2021, iss. 2, pp. 54–64. DOI: [10.35735/tig.2021.6.2.005](https://doi.org/10.35735/tig.2021.6.2.005). (In Russian; abstract in English).

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. *Hydrological Processes*, 2010, vol. 24, iss. 4, pp. 446–460. DOI: [10.1002/hyp.7515](https://doi.org/10.1002/hyp.7515).

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, vol. 51, iss. 2, pp. 1–24. DOI: [10.1080/10256016.2015.1008468](https://doi.org/10.1080/10256016.2015.1008468).

Tarbeeveva A.M., Gartsman B.I. Morfogenez pervichnykh zven'ev gidrograficheskoi seti: naturnye issledovaniya v tsentral'nom Sikhote-Aline [Morphogenesis of primary components of the hydrographic network: field investigations in central Sikhote-Alin]. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 2017, iss. 4, pp. 114–121. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2017-4\(114-121\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(114-121)). (In Russian; abstract in English).

Trufanov A.I., Ivanov V.G., Karavanov K.P., Kislitsyn L.V. Deiterii i protsessy formirovaniya prirodnykh vod yuga Dal'nego Vostoka [Deuterium and the processes of formation of natural waters in the south of the Far East]. In Ivlev A.I. (ed.) *Resursy i khimicheskii sostav prirodnykh vod Dal'nego Vostoka [Resources and chemical composition of natural waters of the Far East]. Voprosy geografii Dal'nego Vostoka. Sbornik 15 [Questions of the geography of the Far East. Issue 15]*. Khabarovsk, Publ. of Khabarovskii kompleksnyi nauchno-issledovatel'skii institut, 1975, pp. 129–136. (In Russian).

Vetshtein V.E. *Izotopy kisloroda i vodoroda prirodnykh vod SSSR [Isotopes of oxygen and hydrogen in natural waters of the USSR]*. Leningrad, Publ. Nedra, 1982. 216 p. (In Russian).