

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

Н.А. Харитонова, Г.А. Челноков, И.В. Брагин, Е.А. Вах

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159, г. Владивосток, 690022, e-mail: tchenat@mail.ru

Поступила в редакцию 30 марта 2011 г.

Многолетние (2002–2010 гг.) комплексные исследования природных вод юга Дальнего Востока позволили охарактеризовать картину распределения в них стабильных и радиоактивных изотопов кислорода и водорода. Показано, что в атмосферных осадках юга Дальнего Востока наблюдается универсальное облегчение изотопного состава от южных к северным районам. По сравнению с атмосферными и морскими водами поверхностные воды региона облегчены δD и $\delta^{18}O$, а их изотопные характеристики подвержены незначительным сезонным колебаниям. В водах региона установлена континентальная зональность в распределении δD и $\delta^{18}O$ и рассчитана локальная линия метеорных вод. Соотношение изотопов $\delta^{18}O$ и δD в подземных водах свидетельствует об их метеорном происхождении, а наблюдаемые вариации – о процессах взаимодействия с водовмещающими породами. Впервые были определены фоновые значения трития в поверхностных водах региона и оценено время циркуляции подземных вод в различных гидрогеологических условиях юга Дальнего Востока.

Ключевые слова: природные воды, стабильные изотопы, тритий, Приморье, Дальний Восток.

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что поверхностные и подземные воды наряду с атмосферными осадками являются важным звеном в системе круговорота воды в природе. Большая часть атмосферных осадков достигает зоны подземных вод, где находится в течение определенного времени, прежде чем попадает в реки. Исследования изотопов кислорода (^{18}O) и водорода (дейтерий и тритий) в природных водах позволяют не только определять генезис вод, но также и устанавливать время их циркуляции.

Основные задачи работы: 1. Установление положения локальной линии метеорных вод относительно мировой (глобальной) линии метеорных вод на основе определения соотношений кислорода-18 и дейтерия в природных водах юга Дальневосточного региона; 2. Выявление условий формирования различных (пресных, минеральных, термальных) подземных вод территории в разных гидрогеологических обстановках; 3. Определение природного уровня трития в водах и оценки времени циркуляции подземных вод.

Объектами исследования являлись различные типы природных вод, а именно: атмосферные осадки (снег/дождь), морские и поверхностные речные

воды, а также подземные воды различных гидрохимических типов и генезиса. Всего было проанализировано более 120 проб воды. Мониторинг изотопных и гидрохимических параметров исследуемых объектов проводился авторами работы в течение последних семи лет, также активно использовались литературные данные [7–9]. В этой статье мы приводим только данные по изотопным исследованиям природных вод региона, сведения по гидрохимии этих вод опубликованы ранее [1, 5, 6, 14].

Определение стабильных изотопов проводилось в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН в лаборатории стабильных изотопов, в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова и Национальном автономном университете Мексики (UNAM). Подготовка проб воды для изотопного анализа проведена стандартным методом высокотемпературного пиролиза воды на углеводе. Для определения изотопных отношений $^{18}O/^{16}O$ и D/H в образцах воды использовали высокотемпературный конвертер TC/EA (ThermoQuest, Bremen, Germany), соединенный с изотопным масс-спектрометром MAT 253 (ThermoQuest, Bremen, Germany), работающий в режиме непрерывного потока гелия. Высокотемпературный конвертер обеспечивает количественное

преобразование кислорода и водорода воды в CO и H₂ в восстановительной среде при температуре 1450°C и последующее хроматографическое разделение газов. Ввод образцов воды (0.5–1 мкл) в реактор термоконвертера производился в автоматическом режиме с использованием автосемплера Combi PAL. Погрешность определения δD и δ¹⁸O (1σ) составляла 0.8 ‰ и 0.2 ‰ (n = 5), соответственно. Измерения изотопных отношений проведены относительно лабораторного стандарта, калиброванного по международным стандартам: VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) – δ¹⁸O = (0.0) ‰; δ²H = (0.0) ‰; SLAP (Standard Light Antarctic Precipitation) – δ¹⁸O = (-55.50) ‰; δ²H = (-427.5) ‰; GISP (Greenland Ice Sheet Precipitation) – δ¹⁸O = (-24.76) ‰; δ²H = (-89.5) ‰.

Для сравнительных оценок использовано соотношение ¹⁸O/¹⁶O относительно водного стандарта SMOW – среднего значения в морской воде.

Измерение содержания радиоактивного изотопа (третий) было выполнено в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН. Для измерения трития использовался β-счет на низкофономом жидкостинциллиационном спектрометре QUANTULUS-1220 с предварительным электролитическим обогащением. Обогащение выполнялось в две стадии, для чего использовалось 12 электролизеров первой и 15 электролизеров второй ступени. Предварительное двухступенчатое обогащение на электролизной установке позволило существенно снизить предел обнаружения трития до рекордной величины 0.03 ТЕ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изотопные соотношения δD и δ¹⁸O

Результаты определения содержаний дейтерия и кислорода-18 приведены относительно международного стандарта SMOW и представлены в табл. 1. Как оказалось, морские воды Амурского и Уссурийского заливов имеют довольно близкие содержания δD и δ¹⁸O: -3 ‰ и -1.7 ‰ и -12.9 ‰ и -1.7 ‰ соответственно. Полученные цифры находятся в хорошем соответствии со значениями δD и δ¹⁸O для морских прибрежных вод п-ова Муравьева-Амурского [13], а также с данными для пролива Сенявина в Беринговом море [5] (табл. 1). Общеизвестно, что высокое содержание тяжелых изотопов в океане вызвано фракционированием изотопов при испарении и конденсировании, в результате чего в морской воде остаются тяжелые изотопы, а в водяной пар переходят более легкие. При конденсации паров воды также происходит разделение изотопов по массе. Соответственно, незначительное облегчение по дейтерию в водах Амурского и

Уссурийского заливов вызвано, вероятно, их опреснением при разбавлении прибрежными поверхностными водами.

Как известно [16], на континентах в изотопном составе атмосферных осадков между δD и δ¹⁸O устанавливается прямая корреляционная зависимость, которая описывается уравнением $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \text{ ‰}$ (SMOW). В атмосферных осадках Приморья (табл. 1, рис. 1) наблюдается универсальное облегчение изотопного состава от южных к северным районам края, что в целом неплохо согласуется с данными В.А. Чудаевой с соавторами по атмосферным осадкам Приморья [12] (табл.1). Сопоставление полученных нами данных по изотопам со значениями δD и δ¹⁸O в дождевых осадках других территорий [18, 19] показало, что дождевые воды юга Дальнего Востока России являются значительно более изотопно тяжелыми (табл. 1, рис. 1), что вызвано, вероятно, временем отбора проб. Пробы дождевых вод были отобраны в августе, когда формирование локальных атмосферных осадков происходит над океаном. Сравнение наших данных по дождевым водам (табл. 1) всецело подтверждает это предположение. Близость значений δD и δ¹⁸O дождевых вод, полученных нами и представленных в работе [15] для дождевых осадков в г. Владивостоке и г. Южно-Сахалинске, также свидетельствует о более изотопно “тяжелом” составе атмосферных осадков, формируемых над океаном.

Хорошо известно [16], что в целом распределение изотопного состава поверхностных вод соответствует климатической зональности Земли, т.е. имеет преимущественно широтный характер: наиболее “тяжелые” метеорные воды развиты в экваториальных широтах, а по мере удаления от него изотопный состав вод испытывает обеднение и по кислороду-18, и по дейтерию (континентальный эффект). Поверхностные воды Приморья были опробованы нами на различных широтах в реках, относящихся к различным водосборным бассейнам и в разные сезоны. По сравнению с атмосферными и морскими водами поверхностные воды региона облегчены δD и δ¹⁸O, а их изотопные характеристики подвержены незначительным сезонным колебаниям. Наиболее “тяжелыми” значениями δD и δ¹⁸O характеризуются реки водосбора Японского моря на юго-востоке Приморья: Рудневка, Волчанка, Пинканка, Петровка, Суходол, Лобог, Артемовка. Столь высокие содержания изотопов в поверхностных водах региона (табл.1) вызваны, вероятно, активным влиянием океана на формирование изотопного состава атмосферных осадков и, как следствие, на формирование состава поверхностных вод.

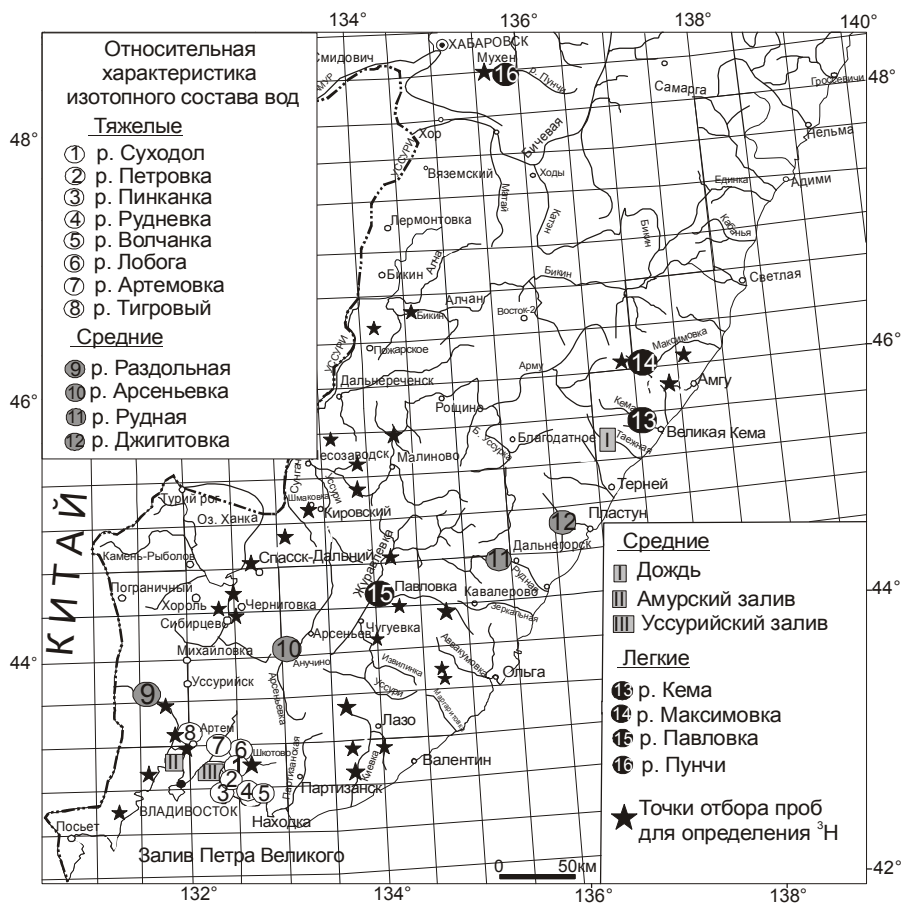


Рис. 1. Карта отбора проб атмосферных, морских и речных вод.

Воды поверхностных водотоков центральной части Приморья (реки Раздольная, Арсеньевка, Рудная, Джигитовка и т.д.) имеют значительно меньшие концентрации тяжелых изотопов кислорода и водорода. Разброс значений составляет от -11.4‰ до -11.7‰ для кислорода-18 и от -81.4‰ до -94.3‰ для дейтерия. Сравнение полученных нами данных с данными для поверхностных вод центральной части Приморья О.В. Чудаева [11] показывает их хорошую сходимость.

При дальнейшем движении в глубь континента в водах поверхностных водотоков отмечаются все меньшие концентрации тяжелых изотопов водорода и кислорода. Наиболее легким изотопным составом вод характеризуются реки, протекающие на севере Приморского края (Павловка, Журавлевка, Кема, Максимовка), и юге Хабаровского края (р. Пунчи). Содержание δD и $\delta^{18}O$ в реке Пунчи составляет -110‰ и -14.4‰ , соответственно, что хорошо согласуется с данными по поверхностным водам Сибири [18] и Восточной Чукотки [10], однако находится в плохом соответствии с данными для поверхностных вод северо-восточной части Китая [17] (табл. 1).

Стоит отметить, что р. Павловка является своего рода граничным водотоком между областями со средним и легким изотопным составом (табл. 1). В целом полученные изотопные характеристики поверхностных вод юга Дальнего Востока согласуются с общепринятой картиной изотопного фракционирования кислорода и водорода в зависимости от широты местности и близости к океану. На графике (рис. 2) отчетливо видно, что расположение фигуративных точек значений изотопов δD и $\delta^{18}O$ в поверхностных водах юга Дальнего Востока подчинено линейной зависимости, которая несколько отличается от глобальной линии метеорных вод Крейга [16]: воды Приморья характеризуются более легкими значениями по δD и более тяжелыми по $\delta^{18}O$. Рассчитанная нами локальная линия метеорных вод для Приморья близка к уравнению $\delta D = 7.6385 \cdot \delta^{18}O + 3.96\text{‰}$ и хорошо коррелируется с мировой линией метеорных вод VSMOW $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10\text{‰}$.

Результаты исследования сезонной зависимости вариаций изотопов в реках Суходол, Раздольная и Павловка отчетливо показывают, что в весенний сезон поверхностные воды являются изотопно более

Таблица 1. Изотопный состав кислорода и водорода природных вод южной части Дальнего Востока России, ‰, SMOW.

п/п	Место отбора пробы	Координаты		время отбора	$\delta^{18}\text{O}$	δD
		долгота	широта			
1	2	3	4	5	6	7
Морские воды						
1	морская вода Амурского залива	131°43'58"	43°07'03"	2007	-1.7	-13
2	морская вода Уссурийского залива	132°7'18"	43°11'29"	2009	-1.7	-12.9
3	Берингово море, лагуна Кивак [10]	-	-	2008	-3.38	-26.82
4	Берингово море, пролив Сенявина [10]	-	-	2008	-1.31	-10.05
Атмосферные осадки						
5	дождь, южные районы Приморья [12]			1999	-7	-52
6	дождь, южное побережье Приморья	132°34'03"	42°50'47"	2008	-6.2	-49
7	дождь, северное побережье Приморья	136°39'50"	45°28'33"	2010	-8.3	-74.1
8	дождь, северные районы Приморья [12]			1999	-13	-95
9	атмосферные осадки, Аляска, метеостанция Bethel [19]	161°8'	60°79'	1981	-17.64	-129.8
10	атмосферные осадки, Аляска, метеостанция Barrow [19]	156°78'	71°3'	1981	-12.63	-98.6
11	атмосферные осадки, р. Селенга, Бурятия [18]	-	-	1992	-12.6	-111.8
12	атмосферные осадки, п. Листвянка, оз. Байкал [18]	-	-	1992	-15.3	-114.9
Поверхностные воды Приморского края						
13	р. Волчанка	132°41'44"	42°55'44"	2010	-8.7	-58.9
14	р. Рудневка	132°30'49"	42°54'56"	2010	-8.7	-59.5
15	р. Пинканка	132°22'52"	43°07'14"	2010	-9.4	-65.8
16	р. Петровка	132°24'20"	43°07'36"	2009	-9	-62.8
17				2010	-9.1	-63.4
18	р. Тигровая	132°53'17"	43°10'55"	2010	-9.1	-63
19	р. Лобoga	132°26'38"	43°13'28"	2010	-9.2	-65.2
20	р. Суходол	132°26'44"	43°13'33"	2008	-9.8	-68.4
21				2010	-10	-69.2
22	р. Артемовка	132°22'14"	43°22'41"	2010	-9.6	-67.5
23	р. Раздольная	131°53'36"	43°33'24"	2010	-11.6	-82.5
24		131°52'57"	43°32'31"	2007	-11.2	-88
25	р. Арсеньевка	133°32'15"	44°32'20"	2010	-11.7	-84.3
26	р. Павловка	-	-	2003 [11]	-11.7	-83.6
27		134°44'60"	44°17'44"	2010	-12.7	-92.3
28	р. Журавлевка	134°07'00"	44°40'30"	2003	-13	-92.8
29	руч. Неробинский [11]	-	-	2003	-12.95	-94.3
30	р. Рудная	135°47'12"	44°21'54"	2010	-11.5	-83.6
31	р. Джигитовка	136°12'20"	44°50'07"	2010	-11.4	-81.4
32	р. Кема	136°46'55"	45°39'16"	2010	-13.2	-96.9
33	р. Максимовка	137°12'03"	45°57'58"	2010	-13.3	-97.3
34	р. Пунчи	136°23'52"	48°19'35"	2006	-14.4	-110
Поверхностные воды Восточной Чукотки [10]						
35	руч. (п. Урелики)	-	-	2008	-13.3	-99.6
36	р. Ключевая	-	-	2008	-14.1	-106
37	оз. Иони	-	-	2004	-14.8	-112.5
Поверхностные воды северо-востока КНР (Внутренняя Монголия) [17]						
38	р. Доуситу	107°54'52"	38°58'18"	2004	-7.1	-68
39	р. Доуситу	106°54'25"	39°04'42"	2004	-7.6	-60
Поверхностные воды Сибири [18]						
40	р. Верхняя Ангара	-	-	1992	-20.2	-152
41	р. Кичера	-	-	1992	-19.6	-148
42	р. Баргузин	-	-	1992	-16.6	-125
43	р. Селенга	-	-	1991	-13.4	-102.5
44	р. Нижняя Ангара	-	-	1992	-15.9	-123.5
45	оз. Байкал	-	-	1992	-15.9	-123.3

Таблица 1. (Продолжение).

1	2	3	4	5	6	7
Подземные воды						
<i>Пресные воды</i>						
46	Центральное Приморье (п. Кировский) [11]	-	-	2003	-12.5	-92
47	Центральное Приморье (п. Горный) [11]	-	-	2003	-12.95	-94.3
48	Восточное побережье Приморья (п. Ольга), глубина залегания 3–5 м [11]	-	-	2003	-12.15	-84
49	Восточное побережье Приморья (п. Ольга), глубина залегания 80–100 м [11]	-	-	2003	-12.43	-77
50	Южное приморье (п. Надеждинское, глубина залегания 80–100 м)	132°01'35"	43°23'08"	2010	-8.5	-66.7
51	КНР, Внутренняя Монголия [17]	107°37'18"	38°25'23"	2008	-10.1	-65
52		107°28'49"	38°23'33"		-8.9	-58
53		107°01'28"	38°05'28"		-9.6	-74
<i>Термальные источники</i>						
54	Ист. Сайон	137°46'06"	45°59'17"	2010	-12	-86.2
				2003 [11]	-12.3	-91
55	Ист. Святая Елена	137°26'38"	45°54'52"	2010	-12.3	-99.2
				2003 [11]	-14.2	-105
56	Ист. Банный	137°35'04"	45°53'24"	2010	-11.5	-83.6
57	Ист. Горячий	133°53'57"	43°22'59"	2008	-12.63	-83.5
58				2010	-11.2	-80.1
<i>Рассолы</i>						
59	Речица, скв. 2ПР	132°23'22"	43°13'07"	2009	-8.1	-67.9
60	Речица, скв. 2ПР	132°23'25"	43°13'07"	2010	-8.4	-67.6
61	Речица, озеро возле скважины 2 ПР	132°23'13"	43°13'19"	2010	-5.2	-49.8
<i>Соленые воды</i>						
62	Раздольненское проявление [12]			1999	-11.85	-86.6
63	Раздольное, скв. 2-Э	131°50'56"	43°31'15"	2002	-11.85	-86.6
64				2006	-12.5	-89
65				2006	-11.2	-88
66				2007	-12.8	-90
67				2008	-13.7	-99
68				2010	-11.5	-82.2
<i>Углекислые воды</i>						
69	Месторождение Нижние Лужки	134°08'41"	43°36'06"	2003 [11]	-12.7	-95.1
70				2006	-14.1	-103
71	Месторождение Горноводное	134°43'19"	43°41'39"	2003 [11]	-11.7	-81
72				2003	-12.2	-82.4
73				2006	-12.2	-87
74	Месторождение Фадеевское	133°53'01"	44°02'05"	2006	-15.1	-110
75				2008	-15.4	-117
76					-15.5	-118
77	Месторождение Шмаковка (уч. Медвежий) [11]	133°27'46"	45°11'02"	2003	-12.5	-92.5
78	Месторождение Шмаковка (уч. Восточно-Уссурский)	133°28'52"	45°10'04"	2006	-12.3	-91
79	Месторождение Ласточка	134°05'17"	46°16'12"	2005	-12.8	-91
80				2006	-13.3	-96
81	Месторождение Мухен (юг Хабаровского края), скв. № 30	136°23'48"	48°19'50"	2008	-25.2	-69
82	Месторождение Мухен (юг Хабаровского края), скв. № 3	136°23'49"	48°19'53"	2008	-14.2	-103
83	Месторождение Гонжинское (Амурская область), скв. 29-6	125°23'08"	53°35'25"	2006	-15	-100
84	Месторождение Гонжинское (Амурская область), скв. 45-Д	125°23'08"	53°35'25"	2006	-14.2	-107
85	Ист. Неробинский [11]	-	-	2003	-14.6	-97.2

Примечание. - нет данных.

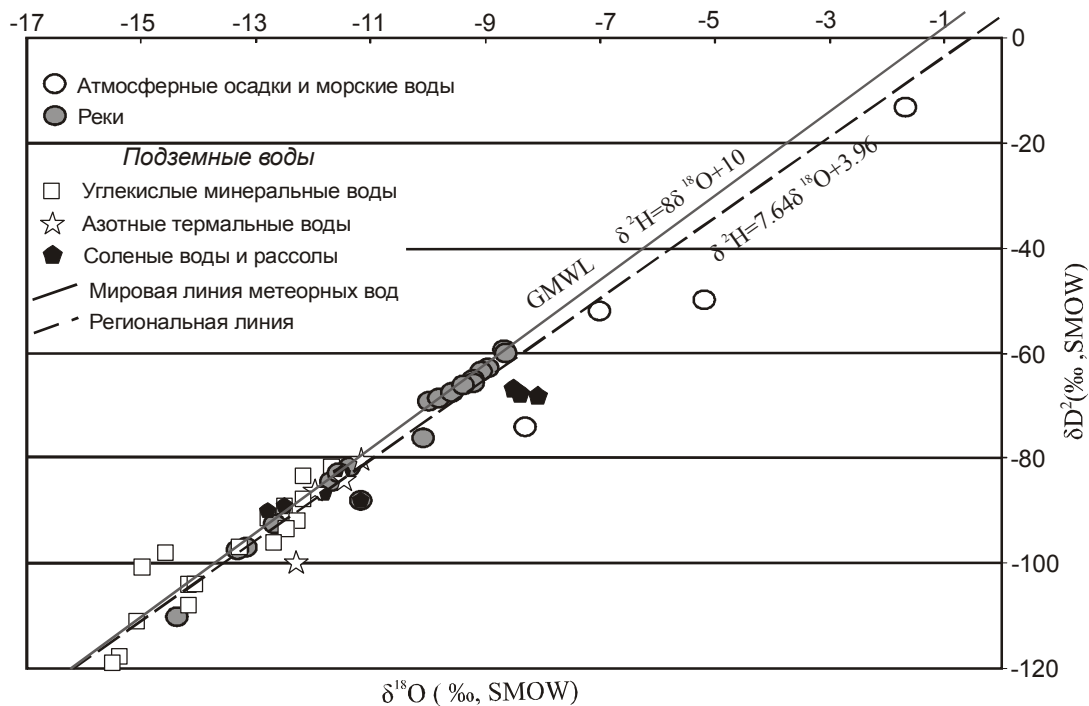


Рис. 2. Соотношения стабильных изотопов в изученных водах.

“легкими”, чем в летний и осенний сезоны (табл. 1). Такое различие вызвано, видимо, изменением в питании поверхностных вод: весной воды наполняются преимущественно в процессе таяния снежного покрова, летом же и осенью водотоки пополняются за счет атмосферных осадков, формируемых над океаном. Общеизвестно, что снег всегда изотопно легче, чем дождь.

Как известно, подземные воды являются наиболее интересными и сложными объектами для изотопного исследования вследствие влияния огромного количества факторов на фракционирование изотопов: физико-химические процессы обмена, сорбция вмещающими породами, взаимодействие с подземными газами и т.д. Для определения значений изотопов δD и $\delta^{18}O$ и исследования их поведения было изучено несколько типов подземных вод южной части Дальнего Востока России, а также Хабаровского края и Амурской области (табл. 1). Данные по значениям изотопов δD и $\delta^{18}O$ в подземных водах Дальнего Востока России располагаются вблизи прямой Крейга (рис. 2) и, несомненно, свидетельствуют об их метеоинфильтрационном происхождении. Сравнение полученных нами данных с уже опубликованными [11] показывает их хорошую сходимость.

На рис. 2 отчетливо видно, что содержания изотопов кислорода-18 и дейтерия во всех типах подземных вод юга Дальнего Востока достаточно

близкие, однако некоторые отличия все же наблюдаются. Наиболее изотопно “легкими” являются углекислые минеральные воды, а наиболее изотопно “тяжелыми” – пресные подземные воды южного Приморья, а также рассолы (табл. 1). Сравнение наших данных с литературными показывает хорошую сходимость с водами из провинции Внутренняя Монголия, КНР [17] и резкое отличие с данными О.В. Чудаева для вод Приморского края [11]. Значения изотопов δD и $\delta^{18}O$, определенные О.В. Чудаевым для вод прибрежных территорий Приморья, значительно более “легкие” чем наши. Стоит отметить, что различие в значениях δD и $\delta^{18}O$ в водах центрального (п. Кировский и п. Горный) и южного (п. Надеждинский) Приморья вполне закономерно, поскольку вызвано влиянием морских атмосферных осадков на формирование подземных вод: чем ближе к морю, тем “тяжелее” воды. Разительное отличие в концентрациях δD и $\delta^{18}O$ в водах прибрежных территорий, вероятно, вызвано широтным эффектом: п. Ольга находится севернее п. Надеждинское.

По полученным ранее гидрохимическим данным [9], слабосоленые воды и рассолы являются наиболее метаморфизованными подземными водами Приморья, генезис которых до конца не выяснен. Данные воды распространены преимущественно в прибрежной зоне Японского моря. Нами были

опробованы слабосоленые воды Раздольненского проявления (скважина глубиной 314 м) и слабые рассолы проявления Речица (скважина глубиной 300 м). Значения их изотопного состава варьируют от -8.1 до -12.8 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от -67.6 до -90 ‰ для дейтерия. В то же время изотопный состав прибрежных грунтовых вод: $\delta^2\text{H} = -76$ ‰ и $\delta^{18}\text{O} = -10.1$ ‰. Очевидно, глубинные соленые воды и рассолы также имеют метеорный генезис, однако при этом рассолы отличаются более высокими содержаниями тяжелых изотопов по сравнению со слабосолеными водами и имеют характерный сдвиг в сторону утяжеления кислорода и водорода. Сопоставление наших данных по значению δD и $\delta^{18}\text{O}$ в соленых водах с данными В.А. Чудаевой с соавторами [12] показало их полное сходство.

Установлено, что типичные соотношения дейтерия и кислорода-18 для остаточных растворов, образованных в процессе испарительного концентрирования морских вод, равны 26–29 [3], в то время как рассолы проявления Речица характеризуются отношениями, равными 8.1–8.4. Столь низкие значения отношений изотопов в Речице, скорее всего, свидетельствуют либо о частичном разбавлении крепких глубинных рассолов метеорными водами, либо влиянием криогенеза, что экспериментально подтверждено для морских вод [3]. В свою очередь, сходство изотопных значений поверхностных вод и слабых рассолов Речица позволяет рассматривать формирование рассолов за счет инконгруэнтного растворения солей (рассолы выщелачивания).

Проявления термальных вод Приморья ($T=+29$ – $+31^\circ\text{C}$) протягиваются с юга на север и приурочены к зоне перехода континент–океан. Нами были опробованы источники на севере края: Святая Елена (долина р. Максимовки), Банный, Сайон и источник Чистоводненской группы на юге – Горячий. Сравнение наших данных с опубликованными [1, 11] показывает их хорошую сходимость для всех источников, за исключением источника Святая Елена (табл. 1).

На диаграмме изотопного состава природных вод юга Дальнего Востока (рис.2) термальные воды, так же как и поверхностные, близко расположены к линии метеорных вод, что однозначно свидетельствует об их инфильтрационном происхождении (табл. 1). Анализ данных показывает, что термальные источники имеют изотопные характеристики, которые показывают отчетливую широтную зависимость. Рассчитанный коэффициент облегчения данного вида вод составляет 4.84 ‰ на 1° широты для дейтерия и 0.59 ‰ на 1° широты для $\delta^{18}\text{O}$. Подчиняясь широтной зависимости, источник Горячий отличается

наиболее “тяжелым” изотопным составом среди рассматриваемых объектов, а ист. Св. Елена, находящийся в верховье р. Максимовки, характеризуется наиболее “легким” изотопным составом и характеризуется небольшим кислородным сдвигом (рис. 1). Некоторое облегчение по кислороду для ист. Св. Елена вызвано взаимодействием термальных вод с водовмещающими породами. Изотопные различия термальных вод источников Горячий и Банный связаны, видимо, с расположением их областей питания: ист. Банный находится в низовье реки, ближе к морю, т.е. амплитуда рельефа между областями питания и разгрузки достигает больших значений, чем в ист. Горячий. Хорошо известно, что с ростом высоты области питания градиенты $\Delta\delta\text{D}/\Delta h$ и $\Delta\delta^{18}\text{O}/\Delta h$ составляют 1.5–4 ‰ и 0.15–0.5 ‰, соответственно [19].

Как уже отмечалось выше, углекислые воды южной части Дальнего Востока характеризуются наиболее легким изотопным составом по кислороду-18 и дейтерию. Как видно из табл. 1 и рис. 1, прослеживается отчетливая широтная зависимость величин δD и $\delta^{18}\text{O}$ в изученных месторождениях. Наиболее изотопно “легкими” являются воды месторождения Гонжинское (δD варьирует от -14 ‰ до -15 ‰ и $\delta^{18}\text{O}$ – от -100 ‰ до -107 ‰), расположенного в континентальной части Дальнего Востока на широте $53^\circ35'25''$, а наиболее “изотопно” тяжелыми – воды месторождения Нижние Лужки (δD варьирует от -12.7‰ до -14.1‰ и $\delta^{18}\text{O}$ – от -95.1‰ до -103 ‰), находящегося на широте $43^\circ36'06''$. Поскольку все известные месторождения углекислых вод Приморья находятся в континентальной части края, характеризующейся затяжной, снежной зимой, их изотопные параметры заведомо ниже, чем у подземных вод, расположенных на побережье.

В более ранних работах [8] уже отмечалось сходство изотопного состава углекислых минеральных и пресных подземных вод в пределах одного месторождения, однако интересно было бы сопоставить изотопный состав углекислых минеральных вод, формирующихся в различных гидрогеологических обстановках. Для сравнения углекислых минеральных вод Приморья с углекислыми водами сопредельных территорий нами были отобраны пробы вод из скважин месторождений углекислых минеральных вод Мухен Хабаровского края и Гонжинское Амурской области. Сопоставление полученных результатов показало, что для данных месторождений также характерна широтная и высотная зависимость. Углекислые воды месторождения Гонжинского являются изотопно наиболее “легкими”, чем воды Приморья и месторож-

дения Мухен, поскольку расположены в более континентальной части Евразии. На месторождении Мухен была установлена зависимость содержания δO^{18} от количества CO_2 в воде: при преобладании объемов CO_2 над объемами воды (в скв. № 30, вскрывающей гидрокарбонатно-натриевые воды месторождения, дебит CO_2 составляет до 6.5 л/с при дебите воды – 0.14 л/с) происходит так называемый “отрицательный сдвиг” по кислороду, который является результатом изотопного обмена кислорода воды с кислородом углекислого газа.

СОДЕРЖАНИЯ 3H В ВОДАХ

Известно, что тритий попадает в поверхностные и подземные воды с атмосферными осадками главным образом из стратосферы, где находится его основной запас. Первые результаты о природных фоновых значениях трития в поверхностных водах Приморского края приведены нами в работе [4]. Для создания более полной картины распределения 3H в поверхностных водах Дальнего Востока мы продолжили свои исследования рек Приморского края, а также поверхностных водотоков Амурской области и Курильских о-вов в 2010 г. (табл. 2). Для определения содержания трития в атмосферных осадках была исследована проба снега (место отбора – г. Владивосток).

Атмосферные осадки зимой в южной части Дальнего Востока характеризуются невысокими значениями 3H (~13 ТЕ) и близки к значениям 3H в атмосферных осадках на европейской территории СНГ [7]. К сожалению, из-за недостатка данных нам не удалось проследить связь содержания трития с сезонном формировании влаги.

Содержание трития в поверхностных водах региона варьирует от 4.7 ТЕ до 29.3 ТЕ, при среднем значении 13 ТЕ (табл. 2), что хорошо коррелируется со значениями 3H в атмосферных осадках. Наиболее высокие значения 20.5–27.6 ТЕ определены в поверхностных водах рек, расположенных в континентальной части региона: в р. Хайкта (Амурская область) и р. Пунчи (Хабаровский край), а наименьшие – на островных территориях – в реках Курильских островов (4.7–6.0 ТЕ).

В целом, содержания трития в водах региона подчиняются уже установленным пространственно-временным закономерностям распределения 3H [7] и хорошо согласуются с уже опубликованными данными В.Н. Сойфера с соавторами [6], которые установили, что в реках Евразийского континента приращение концентраций трития происходит с запада на восток примерно до 130° в.д., а затем к океану происходит спад концентраций. Вышеупомянутым закономерностям противоречат только данные по содержа-

нию 3H в р. Пунчи (Хабаровский край). Концентрация трития в водах данной реки составляет 29.3 ТЕ, что выше, чем концентрация 3H в р. Хайкта (Амурская область), хотя последняя расположена значительно континентальнее. Вероятно, такие высокие значения 3H в воде р. Пунчи указывают на присутствие в районе водосбора реки дополнительного локального источника трития. Однако данное предположение нуждается в специальном исследовании.

Содержание трития в поверхностных водах региона подвержено незначительным сезонным изменениям: осенью концентрации изотопа выше, чем весной. Полученные нами данные несколько противоречат результатам наблюдений Л.С. Власовой и В.И. Ферронского [2], полученным для атмосферных осадков европейской части РФ. По их данным, минимальные концентрации 3H наблюдались в основном в декабре и январе, в нашем случае минимальные концентрации были зафиксированы в мае. Возможно, такое несоответствие вызвано различными источниками формирования изотопа в атмосферной влаге на континентальной части континента и в прибрежных районах.

Помимо сезонных изменений на содержание трития в водах региона активно влияет континентальный эффект – в глубь континента увеличивается содержание 3H , так как по мере переноса атмосферная влага насыщается 3H . В водах рек восточного склона Сихотэ-Алиня (р. Чистоводная, р. Минеральная, р. Максимовка и р. Амгу) концентрации трития значительно ниже (3.1 ТЕ - 11.1 ТЕ), чем в реках южной и западной частей Приморья (водосборы залива Петра Великого и р. Уссури). Наиболее высокие концентрации изотопа отмечены для рек водосбора оз. Ханка (12.7–19.4 ТЕ), расположенного в центральной части Приморского края. Минимальная концентрация трития (1.7 ТЕ) была установлена в воде р. Лозовки, являющейся типичной горной рекой с большим количеством перекатов и порогов. Столь низкие содержания изотопа не могут быть вызваны ошибкой измерения, поскольку были неоднократно перепроверены. Вероятно, питание реки происходит в основном за счет подземных источников, т.е. происходит длительная задержка инфильтрующихся атмосферных осадков в почвогрунтах. В пользу данного утверждения свидетельствует близость концентраций 3H в водах р. Нарва и подземных водах Приморья (табл. 3).

Был установлен эффект протяженности водотока: в истоке реки концентрации трития значительно ниже, чем в устье.

Также были проанализированы подземные минеральные воды некоторых месторождений и прояв-

Таблица 2. Концентрации трития в поверхностных водах юга Дальнего Востока.

Объект	Концентрация, ТЕ	Погрешность измерения, ТЕ	Дата отбора пробы	Площадь водосбора, км ²	Длина реки, км
Амурская область					
р. Хайкта	20.5	1.2	2009, август	-	-
Хабаровский край					
<i>Водосбор р. Амур</i>					
р. Пунчи	29.3	1.8	2005, август	-	-
Приморский край					
<i>Водосбор р. Уссури (без оз. Ханка)</i>					
р. Павловка	12.1	0.5	2009, май	3360	132
р. Большая Уссурка	15.9	0.5	2009, май	29 600	440
р. Тамга	13.3	0.6	2009, май	-	-
р. Кабарга	13.3	0.6	2009, май	-	-
р. Уссури	12.9	0.6	2009, май	193 000	897
	15.6	1.1	2009, октябрь		
р. Малиновка	16.1	1.2	2008, октябрь	6490	274
р. Павловка	13	1	2009, октябрь	3360	132
р. Бикин	15.5	1.4	2009, октябрь	22 300	560
р. Журавлевка	14	1.5	2009, октябрь	5000	114
р. Амгу	11.1	1	2009, октябрь	5424	201
р. Ключ Иванов	14.6	1.2	2009, октябрь	-	-
<i>Водосбор залива Петра Великого</i>					
р. Раздольная	12.3	0.6	2009, май	16 830	245
	16.1	1	2009, октябрь		
р. Брусья	9.3	0.9	2009, октябрь	138	19
р. Бамбуровка	17.2	1.1	2009, октябрь	23.5	9.06
р. Барабашевка	10.4	0.9	2009, октябрь	576	61
р. Нарва	8.4	1.1	2009, октябрь	340	36
ключ Известковый	10.2	1.5	2009, октябрь	-	-
р. Амба	11	0.9	2009, октябрь	330	63
<i>Водосбор оз. Ханка</i>					
р. Кулешовка	12.7	1.4	2008, октябрь	324	43
р. Черниговка	19.4	1.3	2009, май	-	-
р. Сорочевка	17.9	1.2	2008, май	-	-
р. Ляличи	15.2	1.1	2008, октябрь	36	14
р. Кулешовка	15.9	1.1	2009, март	324	43
<i>Водосбор восточного Сихотэ-Алиня</i>					
р. Киевка	13.1	1.3	2008, октябрь	3 120	105
р. Лозовка (приток р. Киевка)	1.7	0.8	2007, октябрь	802	54
р. Максимовка (исток)	11.6	0.3	2009, октябрь	2240	105
р. Максимовка (среднее течение)	10	0.9	2009, октябрь		
р. Чистоводная	9.5	0.9	2009, октябрь	-	-
р. Минеральная	10.7	1	2009, октябрь	-	-
Курильские острова					
<i>Остров Парамушир</i>					
р. Кузьминка	5.3	0.5	2009, сентябрь	-	-
руч. Белый	5.7	0.3	2009, сентябрь	-	-
р. Матросская	4.7	0.3	2009, сентябрь	-	-
<i>Остров Итуруп</i>					
р. Рейдово	5.0	0.3	2009, май	-	-
р. Китовая	5.0	1.4	2009, май		
<i>Остров Кунашир</i>					
р. Кислый	5.7	0.3	2009, май	-	-
р. Петровка	6.0	0.3	2009, май	-	-
р. Андреевка	6.1	0.4	2009, май	-	-

Примечание. - нет данных

лений Приморского края, всего 20 проб. Концентрация трития варьирует от месторождения к месторождению и в среднем составляет 4 ТЕ (табл. 3). Такое низкое, относительно фона (13 ТЕ), содержание ^3H указывает на достаточно длительный период водообмена (около 50 лет) в гидрогеологических системах. Предельно низкий показатель трития, установленный на месторождениях Нижние Лужки (0.07–0.2 ТЕ) и Горноводное (0.2–0.36 ТЕ), а также рассолах проявления Речица (0.1–2.5 ТЕ) свидетельствует о длительном периоде формирования вод, а также об установившемся стационарном режиме для данных гидрогеологических систем при отсутствии внешнего воздействия (эксплуатации).

Сопоставление концентраций ^3H в зависимости от гидрохимического типа вод не позволило выявить какой-нибудь закономерности, т.е. содержание трития в подземных водах зависит только от

времени циркуляции вод и от наличия или отсутствия подтока поверхностных вод. Например, пресные подземные воды на п-ове Дефриз, отобранные с глубины 5–10 м, содержат ^3H в концентрациях (~12.1 ТЕ), близких к концентрациям изотопа в поверхностных водах, т.е. данные воды формируются в условиях очень быстрого водообмена. Пресные воды месторождения Фадеевское, отобранные с глубины 50 м, имеют более низкие концентрации ^3H (~1.8 ТЕ), т.е. время их циркуляции достаточно длинное. Похожая картина наблюдается на месторождении углекислых минеральных вод Мухен: Са-Mg- HCO_3 воды из скважины № 30 по содержанию трития (27.6 ТЕ) очень близки к поверхностным водам реки Пунчи (29.3 ТЕ), в то время как Na- HCO_3 воды скважины № 3 имеют концентрации трития в 4.5 раза меньше (6.0 ТЕ). Таким образом, оба типа минеральных исследуемых вод являются достаточно молодыми и, видимо, имеют

Таблица 3. Концентрации трития в подземных водах юга Дальнего Востока.

Объект	Место отбора	Концентрация, ТЕ	Погрешность измерения	Координаты		Время отбора пробы
				долгота	широта	
<i>Термальные источники</i>						
Чистоводное	накопит. бак	2.1	0.3	133°32'57"	43°03'35"	2009, октябрь
Горячий	колодец	0.3	0.2	133°53'57"	43°22'59"	2009, октябрь
Банный	скв.	1.2	0.2	137°35'04"	45°53'24"	2009, октябрь
Кхуцин	скв.	0.8	0.2	137°45'41"	45°59'37"	2009, октябрь
Св. Елена	скв.	3.1	0.8	137°46'06"	45°59'17"	2009, октябрь
<i>Рассолы</i>						
Речица	скв. 2ПР	0.1 2.5	0.2 0.1	132°23'22"	43°13'07"	2009, октябрь 2009, май
<i>Соленые воды</i>						
Раздольное	скв. 2-Э	12.8	0.4	131°50'56"	43°31'15"	2009, май
<i>Углекислые воды, месторождения</i>						
Горноводное	скв.	0.36 0.2	0.1 0.1	134°43'19"	43°41'39"	2009, май 2007, ноябрь
Фадеевское	скв.	3.12	0.2	133°53'01"	44°02'05"	2009, май
Нижние Лужки	скв.	0.07 0.2	0.09 0.1	134°08'41"	43°36'06"	2009, май 2007, ноябрь
Ласточка	скв.	0.28 5.3	0.1 1.1	134°05'17"	46°16'12"	2009, май 2005, август
Шмаковка (участок Медвежий)	скв.	5	0.2	133°27'46"	45°11'02"	2009, май
Шмаковка (участок Восточно-Уссурский)	скв.	2	1	133°28'52"	45°10'04"	2005, август
Мухен	скв. № 3 скв. № 30	6 27.6	1.1 1.8	136°23'49" 136°23'48"	48°19'53" 48°19'50"	2005, август 2005, август
Гонжинское	скв. 45-Д	0.32	0.4	125°23'08"	53°35'25"	2007, ноябрь
<i>Пресные грунтовые воды</i>						
месторождение Фадеевское	скв.	1.8	0.1	133°53'05"	44°02'07"	2009, май
п-ов Дефриз	скв.	12.1	0.3	132°00'20"	43°17'00"	2009, май
долина р. Раздольной	скв.	5.4	0.2	131°52'45"	43°33'25"	2009, май

период циркуляции не более 55 лет. Однако Са-Mg-HCO₃ воды являются водами более активного водообмена с очень близко расположенными областями их питания и разгрузки, в то время как Na-HCO₃ воды, имея, несомненно, метеорное происхождение, гораздо более длительное время взаимодействуют с водовмещающими породами. Данный вывод подтверждается наблюдаемым в данном типе вод “кислородным сдвигом” (табл. 1), который косвенно свидетельствует о времени взаимодействия воды с водовмещающими породами.

На концентрации ³H в подземных водах месторождений, несомненно, определенное влияние имеет длительность и интенсивность эксплуатации скважин: в случае, когда производится отбор большого объема воды, происходит активизация отдаленных участков месторождения (увеличение размеров депрессионной воронки вокруг скважины), т.е. “замкнутая” система становится открытой и в нее начинают поступать воды с иными значениями ³H. Это утверждение хорошо иллюстрируется данными по эксплуатируемым месторождениям подземных вод (Ласточка, Шмаковка, Мухен, Лотос и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования изотопов кислорода и водорода позволили сформулировать следующие выводы:

– соотношение изотопов ¹⁸O и дейтерия в подземных водах Дальнего Востока свидетельствует о том, что генезис изученных вод является атмосферным, а наблюдаемые вариации изотопов – результат взаимодействия в системе вода–порода–газ;

– полученная нами локальная линия метеорных вод для юга Дальнего Востока близка к уравнению $\delta D = 7.6385 \cdot \delta^{18}O + 3.96 \text{ ‰}$ и хорошо коррелируется с мировой линией метеорных вод VSMOW $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \text{ ‰}$, т.е. исследуемые метеорные воды характеризуются более легкими значениями по δD и более тяжелыми по ¹⁸O по сравнению со стандартом SMOW;

– наблюдается континентальная и широтная зональность в распределении изотопов на территории юга Дальнего Востока: наиболее изотопно “легкие” воды тяготеют к северным районам и материковой части, а “тяжелые” – к побережью Японского моря.

– фоновая концентрация трития в поверхностных водах азиатской части Евразии уменьшается при движении с материковой части континента к океану и составляет: в Амурской области ~ 20 ТЕ, в Приморье – ~ 13 ТЕ и Курильских островах ~ 5.5 ТЕ

– большинство изученных подземных вод юга Дальнего Востока характеризуются достаточно быстрым водообменом, за исключением слабых рассолов проявления Речица, скорость циркуляции которых, настолько мала, что содержание трития в них ниже предела чувствительности метода измерения.

Работа выполнена при поддержке Президиума ДВО РАН, грант 09-3-А-08-411.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагин И.В., Челноков Г.А. Геохимия термальных вод Сихотэ-Алиня. Газовый аспект // Вестн. ДВО РАН. 2009. № 4. С. 147–151.
2. Власова Л.С., Ферронский В.И. Тритий в атмосферных осадках над европейской территорией СНГ как индикатор изменения климатических условий // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 2. С. 247–253.
3. Кононов А.М. Солёные воды и рассолы Оленекского криоартезианского бассейна: Автореф. дис.... канд. геол.-минер. наук. Иркутск, 2009. 18 с.
4. Петухов О.В., Харитоновна Н.А. Тритий в поверхностных и подземных водах Приморского края. Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии Дальнего Востока России: Материалы 3-й регион. конф. молодых ученых. Владивосток: Дальнаука, 2010. С. 172–174
5. Поляк Б.Г., Дубинина Е.О., Лаврушин В.Ю., Чешко А.Л. Изотопный состав воды гидротерм Чукотки // Литология и полез. ископаемые. 2008. № 5. С. 480–504.
6. Соيفер В.Н., Горячев В.А., Вакуловский С.М., Катрич И.Ю. Тритиевые исследования природных вод в России. М.: ГЕОС, 2008. 286 с.
7. Ферронский В.И., Поляков В.А., Романов В.В. Космогенные изотопы гидросферы. М.: Наука, 1984. 268 с.
8. Челноков Г.А., Харитоновна Н.А. Углекислые минеральные воды юга Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2008. 165 с.
9. Челноков Г.А., Харитоновна Н.А., Зыкин Н. Н., Верещагина О.Ф. Генезис подземных минеральных вод Раздольненского проявления (Приморский край) // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 6. С. 65–72.
10. Чешко А.Л., Дубинина Е.О., Вакинин Е.А. и др. Первые данные об изотопном составе водорода и кислорода в термоминеральных водах Восточной Чукотки // ДАН. 2004. Т. 295, № 5. С. 676–680.
11. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 203 с.
12. Чудаева В.А., Чудаев О.В., Челноков А.Н. и др. Минеральные воды Приморья. Владивосток: Дальнаука, 1999. 164 с.
13. Чудаева В.А., Чудаев О.В., Юрченко С.Г. Химический и изотопный (¹⁸O/¹⁶O и D/¹H) состав грунтовых вод некоторых районов Приморья // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 6. С. 57–64.
14. Чудаева В.А., Чудаев О.В. Особенности химического состава воды и взвесей Приморья (Дальний Восток России) // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 2. С. 102–119.
15. Chudaev O.V., Chudaeva V.A., Velivetskaya T.A., Laptev D.

- Stable isotopes D and ^{18}O in the atmospheric precipitations of the south Far East of Russia // Regularities of the structure and evolution of the geospheres: Proc. of VII International Interdisciplinary Scientific Symposium and International Geoscience Programme (IGCP-467), Russia. 2005. P. 319–322.
16. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Sci. 1961. V. 133. P. 1702–1703
17. Hui Q., Mengyao L., Yadong J. et al. Changes of $\delta^{18}\text{O}$ and δD along the Dousitu River, Inner Mongolia, China and their evidence of river water evaporation // Aquat. Geochem. 2007. V. 13. P. 127–142.
18. Seal, R.R., Shanks, W.C. Oxygen and hydrogen isotope systematics of Lake Baikal, Siberia: Implications for paleoclimate studies // Limnol. Oceanogr. 1998. V. 43. P. 1251–1261.
19. Yurtsever Y., Gat J.R. Stable Isotope Hydrology. Viena: IAEA, 1981. P. 103–142.

Рекомендована к печати О.В. Чудаевым

N.A. Kharitonova, G.A. Chelnokov, I.V. Bragin, E.A. Vakh

Isotope composition of natural waters of the southern Far East, Russia

Long-term (2002-2010) extensive research on natural waters of the southern Far East of Russia have allowed characterizing distribution in them of stable and radioactive isotopes of oxygen and hydrogen. It is shown that the isotope composition of the precipitations in the southern Far East is simplified from the southern to northern areas. As compared with the atmospheric and sea waters, the region surface waters are depleted in δD and $\delta^{18}\text{O}$, and their isotope characteristics are sensitive to insignificant seasonal fluctuations. In the region waters, a continental zonal δD and $\delta^{18}\text{O}$ distribution is established and the local meteoric line of waters is calculated. Correlations of isotopes ^{18}O and a deuterium in the ground waters show that they are of meteor origin, and the variations observed indicate the processes of water-rock interaction. For the first time background values of tritium (^3H) in the surface waters of the region have been defined, and the time of the ground waters circulation in various hydrogeological conditions of the southern Far East is estimated.

Key words: natural waters, stable isotopes, tritium, Primorye, Far East.