

РАДОН В МИНЕРАЛЬНЫХ ВОДАХ СИХОТЭ-АЛИНЯ (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)

Г.А. Челноков¹, В.Ю. Лаврушин¹, И.В. Брагин², Н.А. Харитонова^{2,3}, К.Ю. Бушкарева²,
А.А. Павлов², Б.И. Челнокова⁴

¹ФГБУН Геологический институт РАН, Пыжевский пер. 7 стр. 1, Москва, 119017; e-mail: geowater@mail.ru

²ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр-т 100 лет Владивостоку 159,
г. Владивосток, 690022; e-mail: tchenat@mail.ru

³ФГБОУВО Московский государственный университет им. Ломоносова, Ленинские горы 1, г. Москва, 119234

⁴ФГБУН Научно-исследовательский институт медицинской климатологии и восстановительного лечения,
Владивостокский филиал ДНЦ ФПД-НИИМКВЛ, ул. Русская 73-г, г. Владивосток, 690105

Поступила в редакцию

В работе рассмотрены геолого-гидрогеологические условия 19 месторождений термоминеральных вод юга Дальнего Востока России. Исследованы содержания радона в водах, а также урана и тория в водовмещающих породах и вторичных минеральных отложениях. Полученные данные сопоставлены с химическим составом вод и газов месторождений. Установлено, что водовмещающие породы относятся к низко и нормальнорадиоактивным. Содержания урана (< 0.56 мкг/л) и тория (< 0.1 мкг/л) в водах низкие. По содержанию радона большинство минеральных вод Приморья относятся к слабо радиоактивным (0.2–1.5 кБк/л), установлено только два природных источника, имеющих среднюю радиоактивность (1.5–7.5 кБк/л). С бальнеологических позиций, к радоновым водам относятся 7 из 19 опробованных источников. При этом четыре из них относятся к группе азотных термальных вод и три радоновых источника установлено в группе углекислых минеральных вод. Наибольшей радиоактивностью обладают углекислые минеральные воды Шетухинской группы. Подобные природные объекты отражают состояние геологической среды и могут служить как для лечебных целей, так и для организации мониторинга широкого ряда гидрогеохимических параметров. На основании анализа геологических условий и геохимических особенностей проявлений термоминеральных вод были выделены факторы, определяющие уровень радиоактивности, и предложены общие схемы транспорта радона к поверхности в различных геолого-гидрогеологических условиях.

Ключевые слова: минеральные воды, радон, уран, торий, термальные воды, углекислые воды, Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Открытие на рубеже XIX и XX веков явления самопроизвольного распада урана, тория и других элементов привлекли интерес геологов и геохимиков к проблеме естественной радиоактивности земной коры. Многочисленными исследованиями установлено, что в радиационном фоне Земли радон составляет основную часть общей радиационной дозы. Исследования радона в природных объектах имеют несколько прикладных аспектов: экологический (радоноопасность), медицинский (бальнеологический) и геологический (прогноз землетрясений и вулканических извержений; маркер областей подземного питания и тп.). Радоновые обследования широко проводятся

для определения распространённости радона в почвенном воздухе, т.к. ^{222}Rn , попадающий в здания с воздухом из грунта, вносит наибольший вклад в дозу облучения населения. Подземные воды, в зависимости от условий геологической среды, также могут содержать различные концентрации радона. Высокая эффективность применения радиоактивных вод в оздоровительных целях доказана многочисленными экспериментальными и клиническими исследованиями и широко освещена в литературе [3, 4, 7, 18]. И хотя изучение гидроминеральных ресурсов Дальнего Востока охватывает уже более чем 100-летний промежуток, и с самого начала минеральные воды традиционно рассматривались с лечебных позиций, радиоактивность вод большинства природных источников

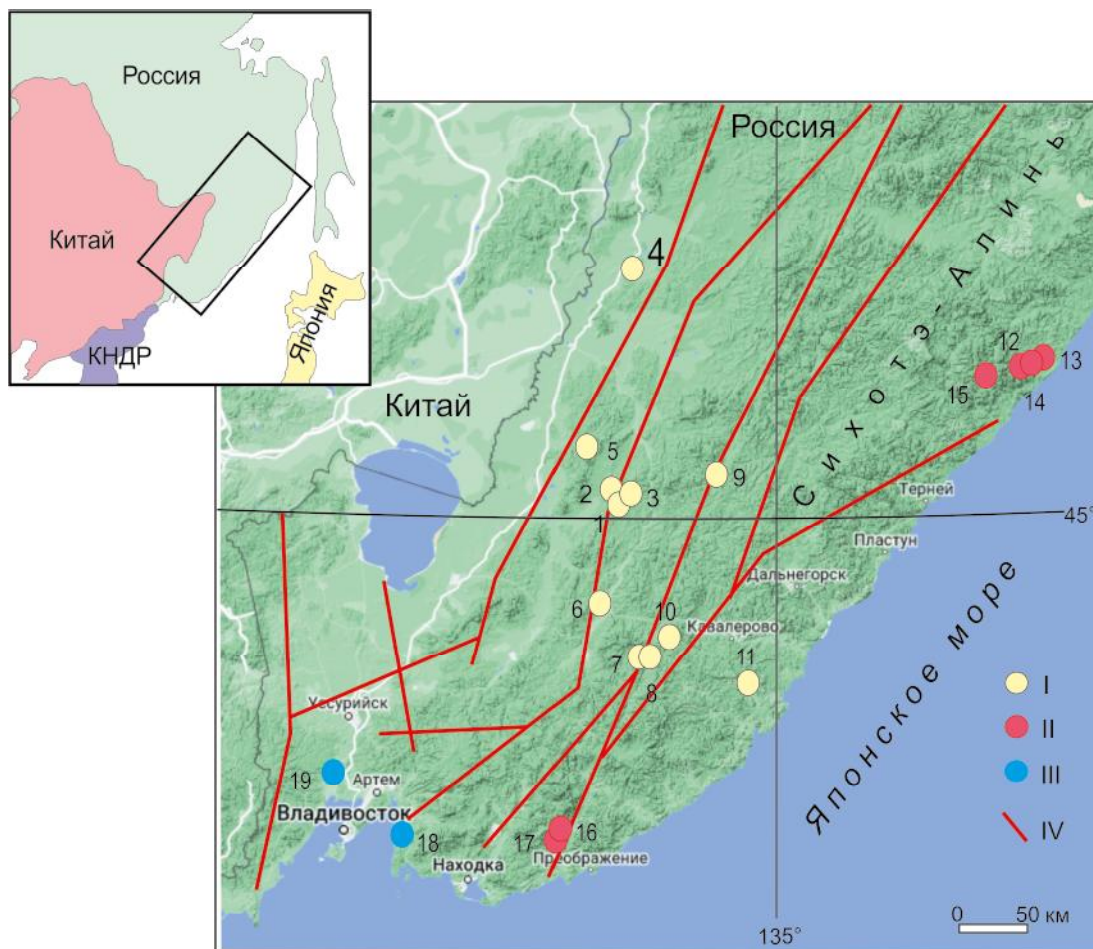


Рис. 1. Обзорная карта опробованных проявлений минеральных вод Сихотэ-Алиня.

I – углекислые минеральные воды: 1 – Неробинский источник; 2 – источник Большой ключ; 3 – источник Фабричный; 4 – месторождение Ласточка; 5 – Восточно-Уссурийский участок Шмаковского месторождения; 6 – Покровский источник (скважина); 7 – источник Иванов Ключ; 8 – источник Курортный; 9 – источник Ариадненский (верхний); 10 – источник Пуховский; 11 – Горноводное. II – азотные термальные воды: 12 – Теплый ключ (лечебница, колодезь); 13 – источник Сайон; 14 – источник Баланов ключ; 15 – источник Святая Елена; 16 – месторождение Горячий ключ; 17 – месторождение Чистоводное. III – азотно-метановые воды повышенной солености: 18 – скважина Речица; 19 – месторождение Раздольное. IV – крупные разломы и структурные швы.

Приморья до сих пор были неизвестны. Единичные сведения о радиоактивности углекислых минеральных вод участков Шмаковского месторождения содержатся в работе А.А. Сычевой [19], а Шетухинской группы – в работе Г.А. Челнокова [25].

Цели данной работы заключались в определении содержания радона в минеральных водах Сихотэ-Алиня, выявлении причин и выделения факторов, определяющих уровень радиоактивности различных типов минеральных вод.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследований являлись углекислые, азотно-метановые и азотные минеральные воды Приморья. Все проявления термоминеральных вод связаны с крупной тектонически-активной структурой

региона – Сихотэ-Алиньской складчатой областью (рис. 1), которая вытянута вдоль берега Японского моря на 1200 км. Площадь Сихотэ-Алиньского гидрогеологического массива занимает около 70 % площади Приморского края.

В ходе полевых работ летнего сезона 2021 г. были проведены измерения содержания радона (изотопа ^{222}Rn) в пробах воды 19 наиболее доступных и используемых населением края проявлений термоминеральных вод (рис. 1). Были отобраны пробы воды, свободных газов, водовмещающих пород и вторичных минеральных образований на химические и изотопные анализы.

Наибольшее распространение имеют углекислые минеральные воды, формирующие Приморскую область углекислых вод, локализованную главным

образом на западном склоне Сихотэ-Алиня [8]. Здесь разведано крупнейшее месторождение углекислых вод Дальнего Востока России – Шмаковка. На восточном склоне разведано только одно крупное месторождение – Горноводное. Самые незначительные по запасам месторождения углекислых вод расположены в центральной части Сихотэ-Алиня (№ 6–10, табл.).

Азотные термальные воды относятся к Восточно-Сихотэ-Алинской провинции азотных щелочных терм и окаймляют Приморскую область углекислых минеральных вод с востока, располагаясь узкой полосой вдоль побережья Японского моря. Выделяется Чистоводненская (№ 16, 17, табл.) и Амгинская группы (№ 12–15, табл.) низкотемпературных термальных вод.

Азотно-метановые воды повышенной минерализации выявлены на юге Приморского края в зоне сочленения отрогов Сихотэ-Алиня и Ханкайского массива. Эти проявления приурочены к прибрежным частям и были вскрыты в конце XX века при проведении поисково-разведочных работ на углеводороды или термальные воды. В процессе работ были пробурены скважины глубиной более 2.5 км, которые позволили обнаружить ранее не известные в Приморье типы вод. На сегодняшний день эксплуатируемым является месторождение Раздольное, находящееся в долине одноименной реки. Большие перспективы имеет уникальное проявление слабых рассолов Речица в бухте Суходол (№ 18, табл.).

Радон является инертным газом, имеет большой молекулярный вес (222) и короткий период полураспада (3.82 сут.), что ограничивает его миграцию. Измерения объемной активности (ОА) радона в воде проводились измерительным комплексом Альфа-рад+ (производства НТМ-Защита, внесён в госреестр средств измерений № 49013-12) непосредственно на источнике. Свидетельство о поверке № МА 0177828. Объёмная активность – это активность, приходящаяся на единицу объёма источника (воды или воздуха). Метод измерений основан на циркуляционном способе перевода радона вместе с воздухом из объёма пробы воды в рабочую камеру блока измерения ОА радона в процессе барботирования. Отбор проб воды осуществлялся в пробирку объёмом 0.046 л по методике, изложенной в работе [16]. Проба помещалась в барботер, а пропускание воздуха через воду способствовало интенсивному выделению ^{222}Rn из жидкости в газовую фазу. По соединительным трубкам радон поступал в измерительную камеру радиометра. Продолжительность перевода радона из барботера в измерительную камеру радиометра, в соответствии с требованиями методики, составляла 5 мин. В некоторых случаях проводились измерения концентраций радона

и торона в почвенном воздухе радиометром СРС-05. Нужно отметить, что погрешность измерений ОА радона на любых измерительных приборах на сегодняшний день составляет не более 20 %. Для каждой пробы было проведено пять измерений и вычислялось среднее.

Количество радиоактивного вещества измеряется не только единицами массы (грамм, миллиграмм и т. п.), но и активностью, которая равна числу ядерных превращений (распадов) в единицу времени. Чем больше ядерных превращений испытывают атомы данного вещества в секунду, тем больше его активность. Поскольку скорость распада радионуклидов различна, одинаковое весовое количество радиоактивных изотопов имеет разную активность. Единицей активности в СИ служит распад в секунду (расп/с). Беккерель – единица измерения активности радиоактивного источника в Международной системе единиц. Один беккерель определяется как активность источника, в котором за 1 секунду происходит в среднем один радиоактивный распад. В разных странах приняты различные величины предельно допустимых концентраций радона в питьевой воде от 11 Бк/л в США, до 300 Бк/л в Европе. В России в соответствии с Нормами радиационной безопасности – НРБ-99/2009 и СП 2.6.1.1292-2003 [12] содержание радона в питьевой воде должно составлять не более 60 Бк/л. Для отнесения минеральных вод к радоновым они должны содержать не менее 185 Бк/л [10]. По концентрации радона различают воды с малой концентрацией (200–1 500 Бк/л); воды со средней концентрацией (1 500–7 500 Бк/л); воды с высокой концентрацией – выше 7 500 Бк/л.

Основным источником радона являются горные породы с повышенным содержанием радиоактивных элементов. Благодаря инертности радон относительно легко выходит из кристаллической решётки радиогенного минерала. Радиоактивность горных пород обусловлена концентрацией в них естественных радионуклидов, родоначальниками которых являются уран и торий. Согласно схемам распада ^{238}U и ^{232}Th стабильными изотопами в семействах урана и тория являются ^{206}Pb и ^{208}Pb , в то время как ^{222}Rn и ^{220}Tn являются промежуточными продуктами распада. Концентрации урана, тория и свинца в образцах водовмещающих пород были определены методами ИСП-МС в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток). Были проанализированы образцы пород наиболее крупных месторождений: Ласточка, Горноводное, Иванов ключ, Речица. Керн отбирался авторами при гидрогеологических изысканиях, проводимых недропользователями. На месторождениях

Таблица. Изотопно-геохимические характеристики минеральных вод Приморья.

№ п/п	Источник	Водовмещающие породы	Возраст пород/ интрузий	Тип воды	Минерализация, г/л	U	Th	²²² Rn
						мкг/л		Бк/л
Вода								Газ
Углекислые минеральные воды								
1	Неробинский	Песчаник, гранит	T ₃ /K ₁	HCO ₃ -Ca-Na	0.3	0.19	0.02	6990
2	Большой Ключ	Песчаник, гранит	P ₂ /K ₁	HCO ₃ -Ca	2.0	0.21	0.005	7365
3	Фабричный	Туфопесчаник, андезит	P ₂ /K ₂	HCO ₃ -Na-Ca-Mg	1.5	0.02	0.004	30
4	Ласточка	Песчаник	J ₂ /нет	HCO ₃ -Mg-Ca-Na	3.0	0.02	0.007	60
5	Шмаковка (В-Уссурский)	Гранит	D, C	HCO ₃ -Ca-Na	0.5	0.01	0.02	648
6	Покровский	Туфопесчаник	K ₂ /нет	HCO ₃ -Ca-Na	1.6	0.02	0.005	64
7	Иванов Ключ	Кремни, песчаник	J/K ₁	HCO ₃ -Na-Ca-Mg	0.7	0.09	0.01	30
8	Курортный	песчаник, кремни	T ₃ /K ₂	HCO ₃ -Ca-Na	1.6	0.08	0.007	48
9	Ариадненский	Туфопесчаник, гранит	P ₂ /K ₂	HCO ₃ -Na-Ca	0.2	0.02	0.003	83
10	Пуховский	Сланцы	T ₃ /нет	HCO ₃ -Ca-Na	0.1	0.17	0.11	48
11	Горноводное	Туфы, гранит	K ₂ /K ₂	HCO ₃ -Ca-Na	1.0	0.03	0.005	100
Азотные термальные воды								
12	Теплый ключ (Амгу)	Гранит	K ₂	HCO ₃ (CO ₃)-Na	0.3	0.06	0.01	387
13	Сайон (Амгу)	Туфы, гранит	K ₂ /P ₁	HCO ₃ (CO ₃)-Na	0.2	0.21	0.01	185
14	Баланов ключ (Амгу)	Туфы, гранит	K ₂ /P ₁	HCO ₃ (CO ₃)-Na	0.2	0.46	0.003	122
15	Святая Елена (Амгу)	Туфы, гранит	K ₂ /P ₁	HCO ₃ (CO ₃)-Na	0.2	0.56	0.003	66
16	Горячий ключ	Кремни, граниты	P ₂ /K ₂	HCO ₃ (CO ₃)-Na	0.3	0.02	0.01	438
17	Чистоводное	Гранит	K ₂	HCO ₃ (CO ₃)-Na	0.3	0.05	0.003	354
Азотно-метановые воды								
18	Речица	Песчаник, алевролит	K ₂ /нет	HCO ₃ -Cl-Na-Ca	26	0.02	0.007	117
19	Раздольная	Песчаник, туф	K ₂ /нет	HCO ₃ -Na	3	0.03	0.008	132

термальных вод анализировались породы, приуроченные к естественным выходам воды.

Гидро- и газогеохимическое опробование проводилось по стандартным методикам. Водные пробы фильтровалась через мембранные фильтры (0.45 мкм). При помощи портативных pH-Eh-TDS-метров фирмы Mettler Toledo измерялись: температура, электропроводность, pH, Eh. Определения солевого состава воды выполнялись методами ICP-MS и ICP-AES в Аналитическом центре ИПТМ РАН (г. Черноголовка). Ошибка определения концентраций элементов в воде была не хуже 15 %. Определения концентраций ионов HCO₃⁻ и Cl⁻ (выполнялись методом кислотного и AgNO₃ титрования в химико-аналитической лаборатории ГИН РАН (г. Москва)). Стабильные изотопы кислорода и водорода анализировались на Picarro 2140i (ГИН РАН). Состав свободного газа исследовал-

ся на хроматографе Кристалл-5000.2 в лаборатории тепломассопереноса ГИН РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения объемной активности радона, а также геолого-геохимические характеристики объектов исследования представлены в таблице. Полученные данные показывают, что большинство минеральных вод Приморья имеют концентрации радона менее 185 Бк/л, что согласно нормам радиационной безопасности [12] не позволяет отнести их к радоновым водам. Пять источников относятся к водам со слабым содержанием радона (185–1 500 Бк/л) и лишь два источника относятся к водам со средними содержаниями (1 500–7 500 Бк/л). Вод с высокой концентрацией радона (> 7.5 кБк/л) не обнаружено. Если рассматривать в зависимости от типа минераль-

ных вод, то четыре радоновых источника выделено в группе азотных термальных вод и три в группе углекислых вод (табл.).

Азотные термальные воды широко распространены в массивах кристаллических пород и наиболее часто характеризуются наличием радона, который является одним из основных бальнеологических факторов их использования. На базе этих вод в пределах Сихотэ-Алиня функционируют две краевые больницы – Чистоводное (№ 17) и Теплый ключ (№ 12), а также разведано Горячеключевское месторождение (№ 16, табл.). С гидрогеологических позиций, это довольно крупные объекты, запасы термальных вод которых оцениваются в 30–70 м³/сут [27, 28, 29]. Полученные значения объемной активности радона для них составляют 350–450 Бк/л (№ 12, 16, 17, табл.). Наименьшие значения ОА радона (от 66 до 185 Бк/л) показали природные термальные источники, разгрузка которых незначительна и происходит в аллювиальные горизонты. Азотные термальные воды Приморья относятся к водам с малой концентрацией радона.

Термальные воды достаточно хорошо изучены с геологических и гидрогеологических позиций [6]. Максимальная глубина изучения месторождений термальных вод бурением составляет 250 м. По условиям формирования термальные проявления Сихотэ-Алинского вулканического пояса можно разделить на два типа: 1-й тип – контактные зоны между интрузиями гранитов и эффузивными породами (№ 13, 14, 15, 16, табл.), и 2-й тип – в пределах активных частей разломов гранитных массивов (№ 12, 17, табл.). Большая часть водовмещающих пород имеет позднемеловой возраст, в одном случае – пермский. Наиболее молодые интрузии относятся к палеогену, интрузивов старше верхнего мела не отмечено. Породы представлены среднезернистыми серыми или розовато-серыми гранитами с содержанием урана от 3.2 до 14.8 г/т и тория от 11.6 до 14.8 г/т. По содержанию U и Th граниты, вмещающие азотные термальные воды, тяготеют к нормальнорадиоактивным, хотя и не достигают граничных значений (U – 5 г/т, Th – 20 г/т).

В Чистоводненской группе источников (№ 16, 17, табл.) температура воды составляет 27 °С, а на севере, в Амгинской группе (№ 12, 13, 14, в табл.) температура увеличивается до 35.4 °С. Характерной особенностью азотных термальных вод являются повышенная щелочность (рН > 8) и низкая минерализация (< 0.3 г/л). Все воды гидрокарбонатные натриевые. Содержание урана в водах варьируются от 0.06 до 0.56 мкг/л, что значительно ниже ПДК (15 мкг/л) для питьевых вод [15]. Подобные концентрации больше характерны для поверхностных вод

(U = 0.04 мкг/л) [2], чем для вод зоны гипергенеза (U = 1.3 мкг/л) [30].

Гидрокарбонатный состав термальных вод, низкие минерализация и температура указывают на то, что их формирование, вероятнее всего, является результатом неглубокой (1–2 км) циркуляции.

Время циркуляции азотных термальных вод от областей питания до области разгрузки оценено с помощью измерения трития [28]. Так для источника Горячий ключ было получено значение 0.04 Бк/кг. Расчет времени транзита термальных вод источника Горячий ключ показал, что это воды замедленного водообмена – 68.5 лет (по снегу) и 57.3 года (по дождю). Это указывает на пространственную разобщенность зоны питания и зоны разгрузки термальных вод, а также подтверждает результаты гидрогеологических и гидрохимических наблюдений, показавших отсутствие непосредственного участия поверхностных и грунтовых вод в питании терм [31].

Для азотных термальных вод выявлены корреляции ОА радона с минерализацией ($r = 0.8$) и слабые корреляции с температурой ($r = 0.3$), которые вероятно связаны с уменьшением растворимости радона в воде при увеличении этих параметров (рис. 2, а, б). Также в термальных водах выявлена обратная корреляция между ОА радона и концентрациями урана (рис. 2, в). Соответственно, содержания урана также слабо коррелируют с температурой ($r = 0.2$) и средне – с минерализацией ($r = 0.7$). Радон относится к инертным газам, и с химической точки зрения способность радона вступать в химические соединения слишком мала. Корреляционные зависимости радона с ураном, скорее, носят индикаторный характер и обратную корреляцию урана с радоном можно было бы считать случайной. Однако, как показано на рис. 2, г, низкие содержания урана в воде обусловлены окислительно-восстановительными условиями, которые являются определяющими для его миграции (рис. 2, з). Характерной особенностью урана в зоне гипергенеза является его интенсивная миграция в окислительной среде и низкая – в восстановительной [30].

Таким образом, содержания урана зависят как от минеральных свойств водовмещающих пород (площади выщелачивания урановых минералов), так и от окислительно-восстановительных условий, которые могут изменяться. При взаимодействии воды с радиогенными минералами в восстановительных условиях уран не переходит в раствор, но вода обогащается радоном. В ходе минералогического исследования гранитов были установлены материнские минералы – источники радионуклидов урана и тория (торит, ураноторит) (рис. 3). Говоря о формах нахождения урана

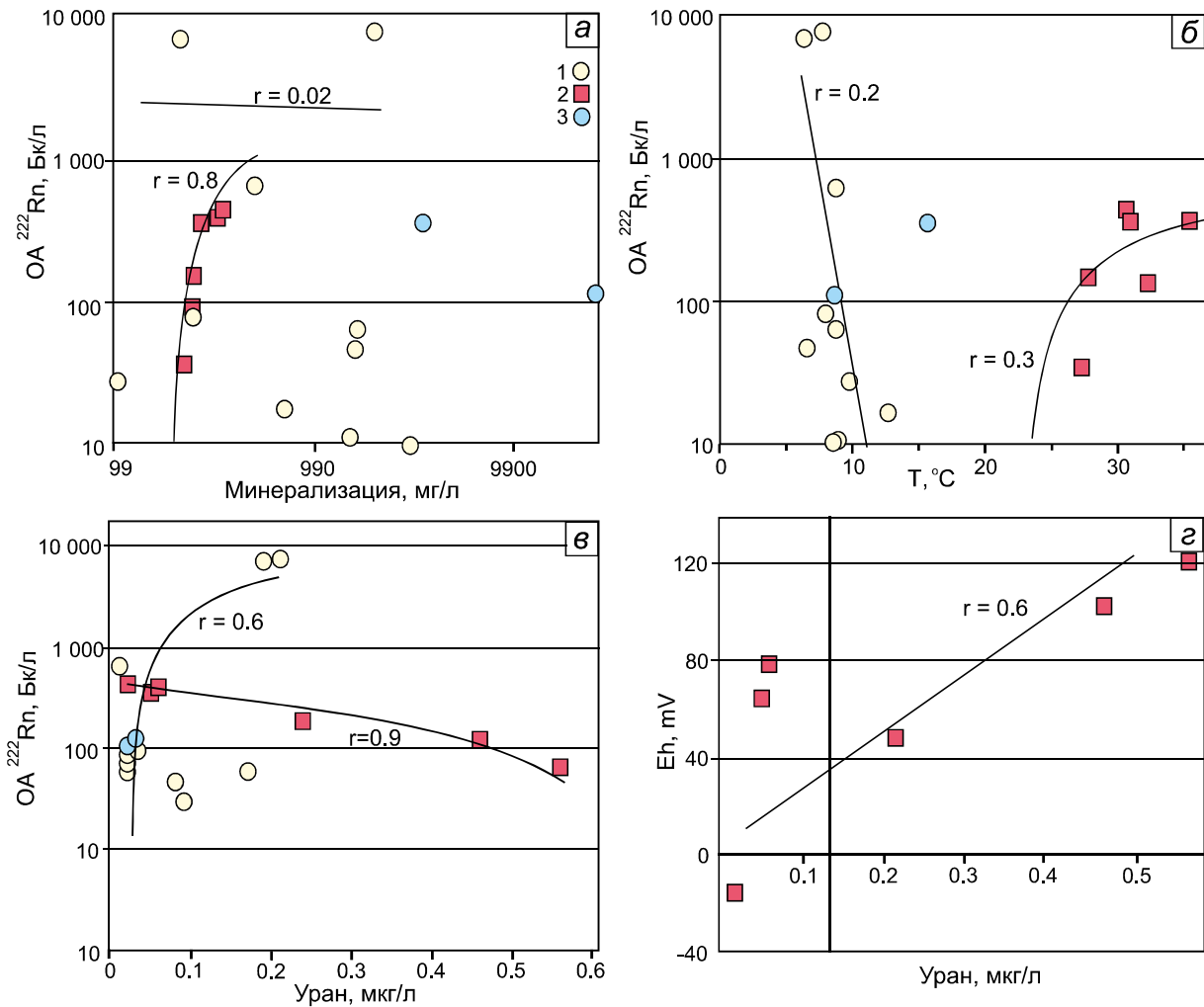


Рис. 2. Зависимости содержания радона в воде от минерализации (а), температуры (б), концентрации урана (в), а также зависимость содержания урана в воде от окислительно-восстановительных условий (г).

1 – углекислые воды, 2 – азотные термы, 3 – азотно-метановые воды повышенной минерализации.

и тория в горных породах, необходимо отметить, что многочисленными исследованиями было показано, что эти элементы в разных содержаниях и соотношениях присутствуют во всех породообразующих и акцессорных минералах [17].

Выделяющийся радон находится в горной породе в трех состояниях: в пространстве закрытых пор, в трещинах и сорбированный свободной внутренней поверхностью всего массива [20]. Циркуляция азотных термальных вод осуществляется по трещинам и зонам дробления, что соответствует модели трещиновато-пористой среды, состоящей из основного массива и хаотически расположенных проницаемых трещин и закрытых пор. Очевидно, что в этих условиях основным механизмом поступления радона к поверхности будет являться поток воды. Хорошая растворимость радона в воде позволяет ему переноситься

в пространстве и концентрироваться в ней. При этом количество радона в воде будет зависеть от наличия минералов – источников радона, скорости потока воды и ограничено периодом полураспада радона (3.8 сут). При изменении напряженного состояния горного массива (сейсмические события) возможно выделение Rn из закрытых пор и кратковременное увеличение его концентраций в воде.

В пользу преимущественно водного транспорта радона свидетельствует и очень низкий газовый фактор азотных термальных проявлений Сихотэ-Алиня. Свободно выделяющийся из воды азот (99.6 об. %) в небольших количествах установлен лишь на 2-х объектах (№ 13, № 16, табл.). Считается, что газовая составляющая (азот) имеет атмосферное происхождение [7, 24]. Отсутствие влияния ювенильных газов для термальных вод Чистоводненской группы

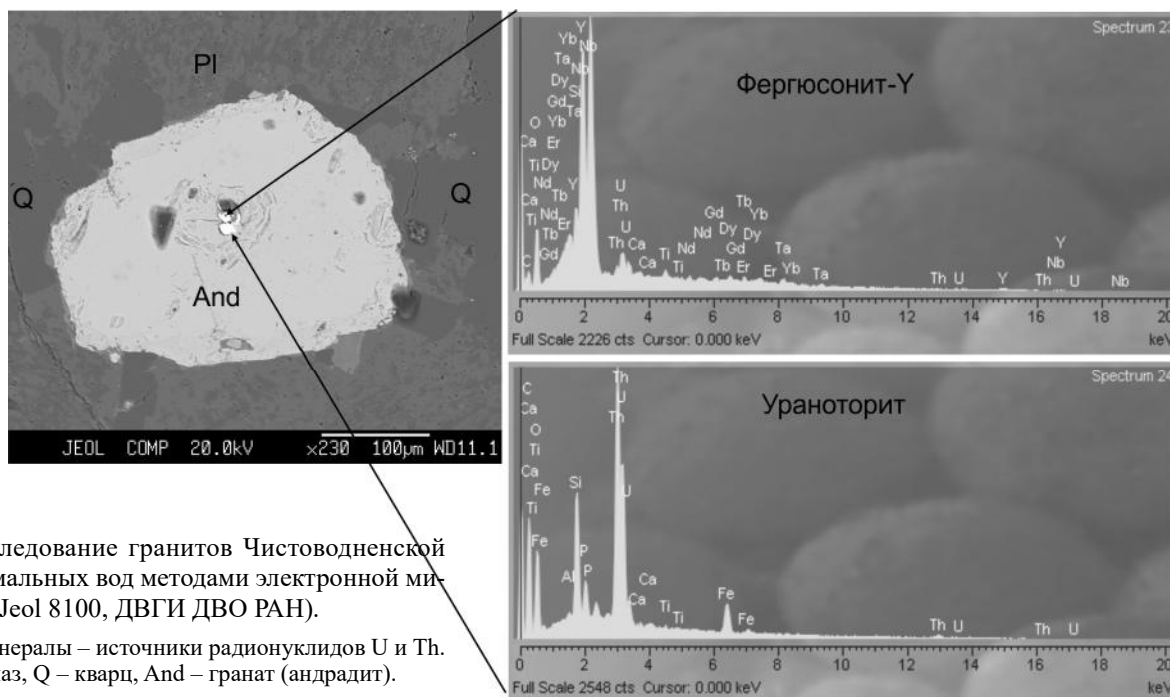


Рис. 3. Исследование гранитов Чистоводненской группы термальных вод методами электронной микроскопии (Jeol 8100, ДВГИ ДВО РАН).

Показаны минералы – источники радионуклидов U и Th. PI – плагиоклаз, Q – кварц, And – гранат (андрадит).

было доказано низкими отношениями изотопов гелия $^3\text{He}/^4\text{He}$ (0.1–0.24)·10⁻⁶ [5].

Углекислые воды Сихотэ-Алиня наиболее хорошо изучены с геологических и гидрогеологических позиций, но очень неравномерно из-за большого числа их проявлений. Из 11 опробованных углекислых источников девять характеризуются низкими значениями ОА радона (от 30 до 650 Бк/л). При этом среди них есть как хорошо разведанные крупные месторождения (№ 4, 5, 6, 7, 11), так и слабо изученные (№ 3, 8, 9, 10) проявления вод (табл.). В скважине, вскрывающей углекислые воды в гранитах Восточно-Уссурского участка Шмаковского месторождения, наблюдаются значения объемной активности радона (650 Бк/л), характерные для месторождений термальных вод в гранитных массивах (табл.). Минерализация вод этого участка также не высока (0.5 г/л), что указывает на быстрый водообмен и короткое время взаимодействия с углекислым газом. Два источника (№ 1, 2) характеризуются средними значениями ОА радона (1.5–7.5 кБк/л).

Максимальная глубина геологического изучения углекислых вод бурением составляет 300 м. По условиям формирования выделяется два основных типа вод: 1) трещинные, формирующиеся в верхней трещиноватой зоне коренных (скальных) пород и локализующиеся вокруг активных частей разломов, выводящих углекислый газ (№ 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, табл.), и 2) пластово-поровые воды, образующиеся в поровых коллекторах мощных (более 20 м) аллюви-

альных отложений и распространенные над выходом активной части разлома, подводящего углекислый газ (№ 6, 8, 10).

Углекислые воды залегают в различных по возрасту и типу водовмещающих породах, представленных песчаниками, туфопесчаниками, алевролитами, кремнистыми сланцами, а также гранитами (табл.). Возрастной интервал пород варьируется от девона до верхнего мела. Широко развиты меловые интрузии кислого состава. Лишь в пределах Восточно-Уссурского участка Шмаковского месторождения интрузивы имеют более древний возраст. Исследование керн скважин, пробуренных на месторождениях Ласточка, Иванов Ключ и Горноводное, показал, что по содержанию U и Th вмещающие породы характеризуются как слаборадиоактивные (U – 3.2 г/т, Th – 14 г/т), ториеносные (Th/U = 4.4). Интервалы нормально радиоактивных пород (U – 5.07 г/т, Th – 21 г/т) встречаются редко.

Все углекислые воды являются гидрокарбонатными, со смешанным катионным составом и имеют различную минерализацию (табл.). Воды холодные (от 6 до 12 °С), имеют слабокислый или нейтральный pH (4.5–7.5). Концентрация гидрокарбонат-иона достигает 2 400 мг/л, содержания хлор-иона и сульфат-иона незначительны. Наиболее минерализованными являются гидрокарбонатные натриевые воды месторождения Ласточка (3.0 г/л), наименее – гидрокарбонатные натриево-кальциевые воды Пуховского источника (0.1 г/л).

Анализ соотношений основных компонентов свидетельствует о том, что минерализация углекислых вод напрямую зависит не столько от поступления в водный раствор основных катионов, сколько от внедрения в воду углекислого газа, который, растворяясь, способствует увеличению содержания HCO_3^- . Также увеличиваются содержания бальнеологически активных компонентов, например SiO_2 (до 90 мг/л) и железа (до 30 мг/л). Содержание урана и тория суммарно не превышает 0.3 мкг/л, при этом уран доминирует (табл.). В целом, содержания урана и тория ниже, чем принятые для зоны гипергенеза по Шварцеву ($U = 1.3$ мкг/л, $Th = 0.24$ мкг/л) [30].

Изотопные соотношения δD (от -87.8 до -103.8 ‰, SMOW) и $\delta^{18}O$ (от -12.2 до -14.7 ‰, SMOW) в углекислых водах свидетельствуют об их метеорном происхождении, а содержания трития в среднем составляет 0.59 Бк/кг [28]. Расчет возраста воды по поршневой модели показывает, что минимальное время пребывания вод в гидрогеологической системе составляет ≈ 21.5 лет. Установлено, что содержание 3H в минеральных углекислых водах зависит только от времени их циркуляции и степени разбавления поверхностными водами [21].

Общая газонасыщенность углекислых вод невысока, но значительно выше, чем в азотных термальных водах. Газовый фактор редко превышает 1–3 м³/т (отношение объема газа к объему воды). Основным компонентом в газах является CO_2 , второстепенными – азот, кислород, аргон и гелий. Величина CO_2 в составе свободно выделяющейся газовой смеси находится в диапазоне значений 95.0–99.9 об. %, количество N_2 составляет 0.1–5.2 об. %, O_2 – 0.005–0.5, Ar – 0.05–0.28 об. %. Сумма прочих газов (CH_4 , He , Ne и др.) в среднем не превышает 0.05 об. %.

Выходы холодных углекислых вод всегда связаны с территориями, где проявляется современная тектоническая активность. Как правило, очаги разгрузки вод либо локализуются в зонах высокой сейсмической активности, либо приурочены к узлам пересечения разрывных нарушений. Именно тектоническая структура территории (наличие проницаемых разломов и присутствие перекрывающих пород) приводит к активному взаимодействию в системе вода–порода–углекислый газ, формированию месторождений углекислых минеральных вод [11, 22]. Нередко выходы углекислых минеральных вод прослеживаются прерывистой цепочкой по сейсмоактивным линиям значительной протяженности либо по фрагментам кольцевых структур (м-е Горноводное).

В углекислых водах корреляций между радоном и химическим типом вод, температурой или минера-

лизацией не установлено. Слабая корреляция обнаружена только для радона и урана ($r = 0.6$; рис. 2, в). Вероятно, это связано с тем, что углекислые воды, в отличие от азотных терм, очень сильно различаются по разнообразию водовмещающих пород и гидрогеологическим условиям.

Самые высокие значения объемной активности радона (6990 Бк/л и 7365 Бк/л) в пределах Сихотэ-Алиня установлены в Шетухинской группе углекислых вод (№ 1, 2, табл.). Эти значения более чем в 15 раз превышают концентрации радона, измеренные на других проявлениях минеральных вод Приморья.

С гидрогеологических позиций проявления Шетухинской группы изучены слабо, буровых работ здесь никогда не проводилось. Геологические условия Неробинского источника исследованы более полно, т.к. он находится в зоне разрабатываемого ранее месторождения касситерита. Это, пожалуй, единственное среди известных проявлений углекислых вод Приморья проявление, которое располагается в пределах рудной зоны. В конце 20-го века было установлено, что вода источника имеет самые высокие в крае содержания мышьяка (0.14 мг/л), а также цинка (1.3 мг) и вольфрама (0.2 мкг) [29].

Естественный выход минеральных вод приурочен к зоне разуплотнения пород, связанной с разломом, по которому заложена долина небольшого ручья. Водовмещающие породы представлены трещиноватыми песчаниками и алевролитами триаса на контакте с гранитами раннего мела.

По составу минеральные воды источника – гидрокарбонатные натриево-кальциевые, углекислые, железистые, кремнистые. Температура воды +7 °С. Минерализация воды невысокая (0.3 г/л), характеризуется слабокислыми значениями среды pH 5.1–5.2 и окислительными условиями Eh +92 – +400 мВ. Содержание урана по данным многолетних анализов, составляет 0.19–0.39 мкг/л, а тория – 0.003–0.02 мкг/л. Изотопные характеристики показывают, что воды имеют атмосферное происхождение ($\delta D = -101.4$ ‰, $\delta^{18}O = -14.7$ ‰, SMOW), а время их взаимодействия с водовмещающими породами, по результатам анализа на тритий, около 20 лет. Высокая скорость циркуляции имеет свое отражение и в низких значениях минерализации (при слабокислом pH воды), и в окислительно-восстановительных условиях водной среды. Таким образом, мы можем характеризовать углекислые минеральные воды как воды неглубокой циркуляции.

На источнике происходит активное выделение свободного газа, который на 94.1 об.% представлен углекислым газом и на 5.8 об.% азотом. Газовый фак-

тор, т.е. отношение объема газа к объему воды около $1 \text{ м}^3/\text{т}$. Установлено, что у кислорода, азота и аргона – атмосферный генезис, в то время как углекислый газ и гелий имеют глубинное происхождение [27]. Генезис CO_2 , по изотопным отношениям $\delta^{13}\text{C}$ и соотношениям $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$, связан с мантийными процессами, в то время как влияние земной коры незначительно [22]. Аномально высокие концентрации почвенного радона в пределах минерального источника Неробинский были установлены в ходе предшествующих работ [25]. Полученные результаты показали, что ОА эманаций радона варьируются от 20 до $360.8 \text{ кБк}/\text{м}^3$. Замеры почвенного радона на расстоянии 50 метров от источника показали значения $100\text{--}136 \text{ Бк}/\text{м}^3$.

Наряду с анализом воды и газа были исследованы вторичные минеральные отложения, активно формирующиеся в пределах источника. Осадки представлены гидроксидами железа ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 68 \text{ мас. \%}$) и кремнием ($\text{SiO}_2 = 2.98 \text{ мас. \%}$), имеют высокие содержания редких земель, Y, W (4 г/т), As (867 г/т) и свинца (372 г/т). Отметим, что содержание свинца в воде составляет лишь $0.013 \text{ мг}/\text{л}$. Содержания урана и тория во вторичных образованиях составляют 1.7 г/т и Th – 0.12 г/т, соответственно, классифицируя эти отложения как слаборадиоактивные. По сравнению со всеми исследованными водовмещающими породами Приморья, вторичные отложения являются существенно ураноносными ($\text{Th}/\text{U} < 2$). Это объясняется различной химической подвижностью урана и тория в геологических средах. Торий не имеет растворимых минералов, а его миграция в воде осуществляется в основном во взвешенном или коллоидном состояниях. Это подтверждается результатами исследования образцов под электронным микроскопом (рис. 4, а), позволившими установить, что одним из источников тория, а также редких земель в изученных отложениях являются обломки монацита.

На уровне, доступном для электронной микроскопии, свинец диагностирован в составе галенита (рис. 4, б). Пока не изучено, какая часть свинца в осадках имеет радиогенную природу, т.к. стабильные изотопы ${}^{206}\text{Pb}$, ${}^{207}\text{Pb}$, ${}^{208}\text{Pb}$ образуются в результате радиоактивного распада соответственно ${}^{238}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$ и ${}^{232}\text{Th}$. Однако исследования распределения урана и тория в кальдере Узон (Камчатка) показали зависимость концентраций свинца от суммы концентраций урана и тория в гидротермально-измененных породах [1]. Изотопный анализ свинца из измененных пород и осадков Узона показал, что в среднем содержание ${}^{206}\text{Pb}$ (конечного продукта распада уран-радиевого ряда) почти на $\sim 5.5\%$ выше, чем у наиболее распространенного современного свинца, а изотопа ${}^{208}\text{Pb}$ (конечного продукта распада ториевого ряда), наоборот, на $\sim 1\%$

ниже. По мнению авторов, это связано с уменьшением торон-радонового отношения спонтанных газов, выходящих через прогретые зоны гидротермальной системы. Исследования изотопного состава свинца пород Неробинского источника – задачи ближайшего будущего. Измеренные нами значения эманации торона через почву в районе Неробинского источника показали аномально высокие значения до 930 распадов. Подобные значительные концентрации короткоживущего торона (период полураспада 55.6 сек), а также высокие содержания радона могут свидетельствовать либо о том, что источник радионуклидов находится на небольшой глубине, либо о каком-то механизме быстрой доставки радона к поверхности.

Для того что бы достичь дневной поверхности с больших глубин, радон (а тем более торон) должен обладать высокой самопроизвольной субвертикальной миграцией, которую ограничивает большой молекулярный вес (222) и короткий период полураспада (3.82 сут.) [9]. Существует несколько моделей, широко обсуждаемых в научной литературе. Классической является модель диффузионно-конвективного массопереноса радона в однородной пористой среде [35, 38]. Модель «геогаза» – описывающая движение радона по трещинам во влагонасыщенных породах [14]. Модель дегазации водоносного горизонта – в которой концентрация радона в воде является функцией глубины залегания радийнасыщенных пород [36]. Тем не менее, как в рамках классической диффузионно-конвективной модели, так и с помощью теории «геогаза» трудно объяснить высокую миграционную способность радона. Рассматривая возможные варианты корреляций потоков CO_2 и ${}^{222}\text{Rn}$, некоторые исследователи допускают, что скорости потока глубинного CO_2 по зонам разуплотнения могут достигать величин $0.1\text{--}1 \text{ м}/\text{сек}$. При таких скоростях радон может поступать к поверхности из глубоких горизонтов в течение нескольких дней [34, 37].

Азотно-метановые воды повышенной солености распространены исключительно в пределах южного побережья Приморского края (рис. 1), что в первую очередь связано с геологическими и палеогеогеологическими условиями. Здесь развиты краевые бассейны субнапорных вод, приуроченные к кайнозойским наложенным впадинам. Бассейны ограничены областью разгрузки. Для краевых бассейнов субнапорных вод характерен существенно глинистый состав слагающих их терригенных и эффузивно-терригенных пород, чем обусловлены ограниченные водно-емкостные свойства последних.

Воды данного типа залегают на глубинах $100\text{--}500 \text{ м}$ и приурочены к зонам тектонических нару-

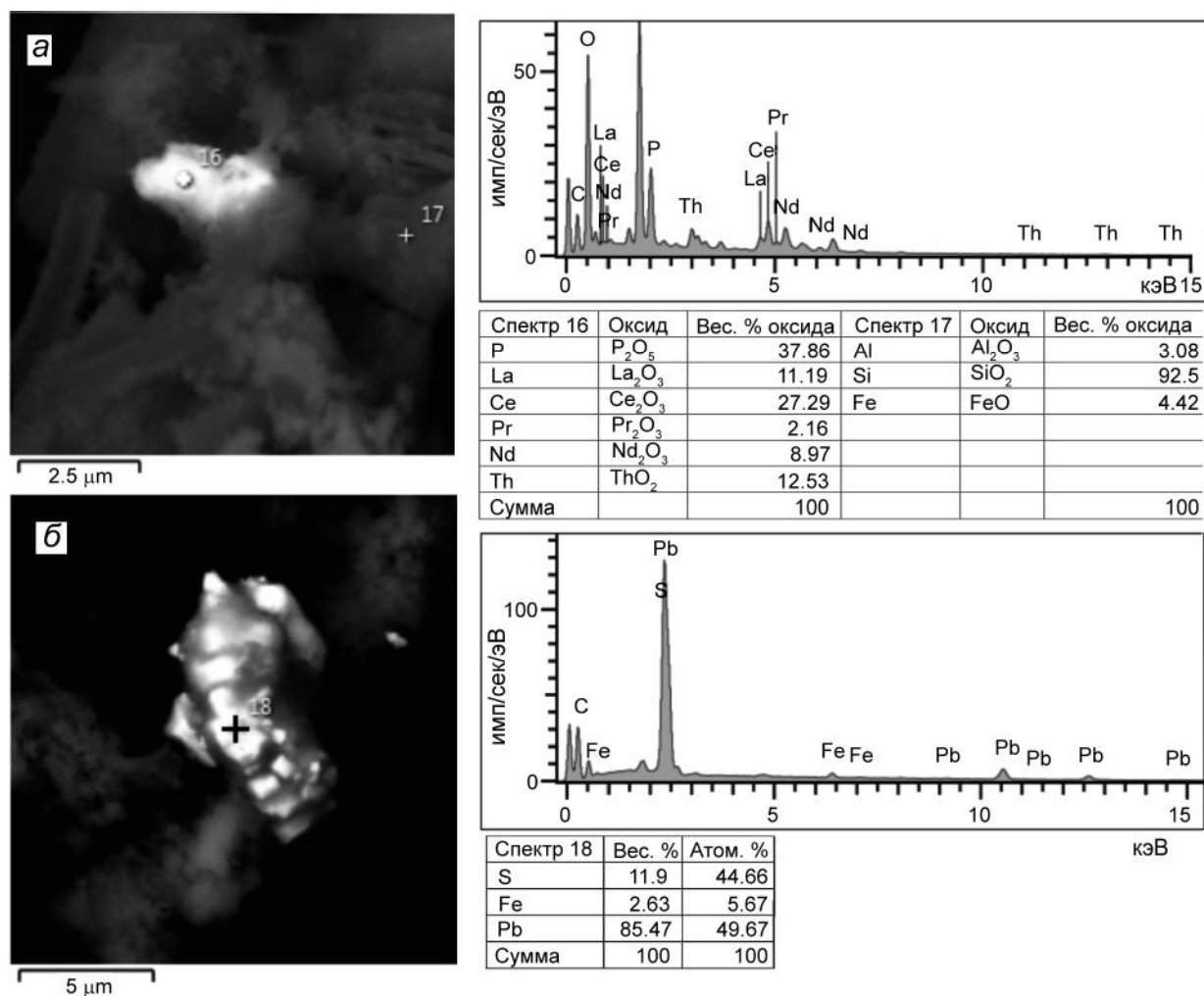


Рис. 4. Исследование вторичных отложений Неробинского углекислого источника методами электронной микроскопии: *а* – содержания тория и редкоземельных элементов в монаците; *б* – галенит.

Двухлучевой сканирующий электронный микроскоп Tescan Lyra 3 XMN + EDS AZtec X – Max 80 Standart, ДВГИ ДВО РАН.

шений. В естественных условиях воды не имеют разгрузки на дневную поверхность, а вскрывающие их скважины изливаются с небольшим дебитом. По минерализации и гидрохимии изученные воды можно разделить на два типа: 1) воды гидрокарбонатного натриевого либо гидрокарбонатного натриево-кальциевого состава с минерализацией 3 г/л, 2) воды хлоридного натриево-кальциевого (с преобладанием кальция) или смешанного катионного состава с минерализацией более 26 г/л (табл.).

Воды первого типа отмечены в мезозойских отложениях, имеющих в своем составе органические остатки. Вскрывающие их скважины изливаются с небольшим дебитом (6 м³/сут), примером может служить Раздольненское месторождение [32]. Характерной особенностью таких вод являются высокие содержания гидрокарбонат-иона, натрия, бора и фтора,

а также низкие количества сульфат-иона. Несмотря на повышенную соленость, данный тип вод имеет метеорное происхождение ($\delta^{18}\text{O} = -12.3\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -85.3\text{‰}$, SMOW). В условиях эксплуатации фиксируется приток современных вод ($\delta^2\text{H} = 2$).

Ко второму типу относятся слабые рассолы проявления Речица, которые залегают на глубине более 250 м, имеют минерализацию 26–110 г/л и хлоридный натриево-кальциевый состав [23]. Концентрация Ca²⁺ в рассолах в два раза выше концентрации Na⁺. Содержания брома находятся на уровне морских вод и выше – 65–120 мг/л. Соотношения стабильных изотопов $\delta^{18}\text{O}$ (-9.0‰, SMOW) и $\delta^2\text{H}$ (-68.8‰, SMOW) показывают, что формирование таких вод происходило в теплом климате. Тритий отсутствует, что характеризует замкнутость водоносного горизонта в стационарных условиях.

Воды этих проявлений характеризуются значениями радона ниже уровня, необходимого для отнесения вод к радоновым (ОА Rn от 117 до 132 Бк/л). Азотно-метановые воды не многочисленны, поэтому нет возможности выделить каких-либо статистически значимых корреляций. Уровни концентраций радона, урана и тория типичны для подземных вод Сихотэ-Алиня, каких-либо аномалий не наблюдается (табл.). Поинтервальное исследование керна 100-метровой скважины, пробуренной в районе проявления Речица (№18), показало, что с глубиной содержание урана в меловых песчаниках увеличивается от 0.6 до 4.8 г/т (среднее содержание 1.44 г/т). Для тория такой зависимости не наблюдается, его содержания варьируются от 2.8 до 6.9 г/т (среднее содержание 4.75 г/т). По уровню содержания урана и тория песчаники являются слаборадиоактивными ($U = 1-1.5$ г/т, $Th = 3-7$ г/т), ториеносными ($Th/U = 4.6$). Содержания урана и тория в песчаниках ниже, чем в изученных гранитах других проявлений минеральных вод края.

В газовом составе таких вод присутствует метан (35–40 об. %) и азот (35–45 об. %), а уголекислоты содержится менее 10 %. Газовый фактор очень низкий, а транспорт радона к поверхности с водой в этих условиях затруднен из-за низкого дебита скважин. По результатам газогеохимических исследований в акватории бухты Суходол выделена перспективная на метан газоносная площадь [13]. В этих условиях наиболее вероятно, что источниками радона являются водовмещающие породы, а за его транспорт отвечают газы, которые образуются в результате преобразования органического вещества пород. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными по минеральным источникам о. Сахалин, где было установлено, что на проявлениях уголекислых вод объемная активность радона выше, чем в водах, где доминировал метан [26, 33].

Факторы, определяющие уровень радиоактивности различных типов вод

На основании рассмотренных геологических условий и геохимических особенностей проявлений термоминеральных вод Сихотэ-Алиня были выделены факторы, определяющие уровень радиоактивности и предложены общие схемы транспорта радона к поверхности в различных геолого-гидрогеологических условиях (рис. 5).

Основными факторами, влияющими на содержание радона в подземных водах являются: 1) диффузия радона из более глубоких геологических горизонтов; 2) перенос радона из глубоких горизонтов в приповерхностные водоносные горизонты другими газами; 3) фильтрация подземных вод по радиоактивным по-

родам. Также на содержание радона в воде оказывают влияние: изменение дебита источников (важно для эксплуатируемых водоносных горизонтов), температура вод (с одной стороны, при увеличении температуры уменьшается растворимость радона в воде, а с другой стороны, увеличивается эманулирующая способность пород), условия выхода вод на поверхность (если на изливе вода течет беспокойной струей или падает с высоты, то она теряет большую часть радона).

Основным механизмом поступления радона в азотные термальные воды является циркуляция атмосферной воды в гранитных массивах и вынос радиоактивных эманаций водой в приповерхностную зону. При этом концентрации ОА радона отражают природный фон гранитных массивов, в пределах которых происходит циркуляция воды (рис. 5, а). Низкие значения ОА радона (до 650 Бк/л) здесь в первую очередь обусловлены низким газовым фактором, незначительными дебитами разгрузки термальных вод (0.5 л/с) и щелочным характером воды, который не подразумевает интенсивного взаимодействия воды с породой в приповерхностной зоне (ограниченная растворимость минералов).

Для проявлений холодных уголекислых минеральных вод основным фактором, влияющим на концентрации радона, является совпадение областей генерации радона с потоком глубинных газов. Транспортом для радона и торона в этих структурах являются потоки газов (CO_2), поднимающиеся по тектоническим нарушениям из глубоких горизонтов в приповерхностные водоносные горизонты (рис. 5, б). Источники радона в уголекислых минеральных водах связаны с приконтактовыми зонами гранитных интрузий с водовмещающими породами различного генезиса, содержащими уран и торий. При таком механизме переноса концентрации радона в приповерхностных водоносных горизонтах могут быть самыми высокими, т.к. радон, захваченный потоком уголекислого газа, может поступать из глубоких горизонтов в течение нескольких дней.

В азотно-метановых водах осадочных бассейнов характеризующихся замедленным водообменном в силу низкой проницаемости пород, поступление радона в воду связано с диффузией из осадочных водовмещающих пород, а также более глубоких геологических горизонтов (в процессе эксплуатации месторождений) (рис. 5, в). Также миграция радона вероятнее всего связана с газами, которые образуются в результате преобразования органического вещества пород.

Медицинские и геоэкологические аспекты использования радоновых вод

Азотные термальные воды по всему миру очень часто содержат радон, который является одним из

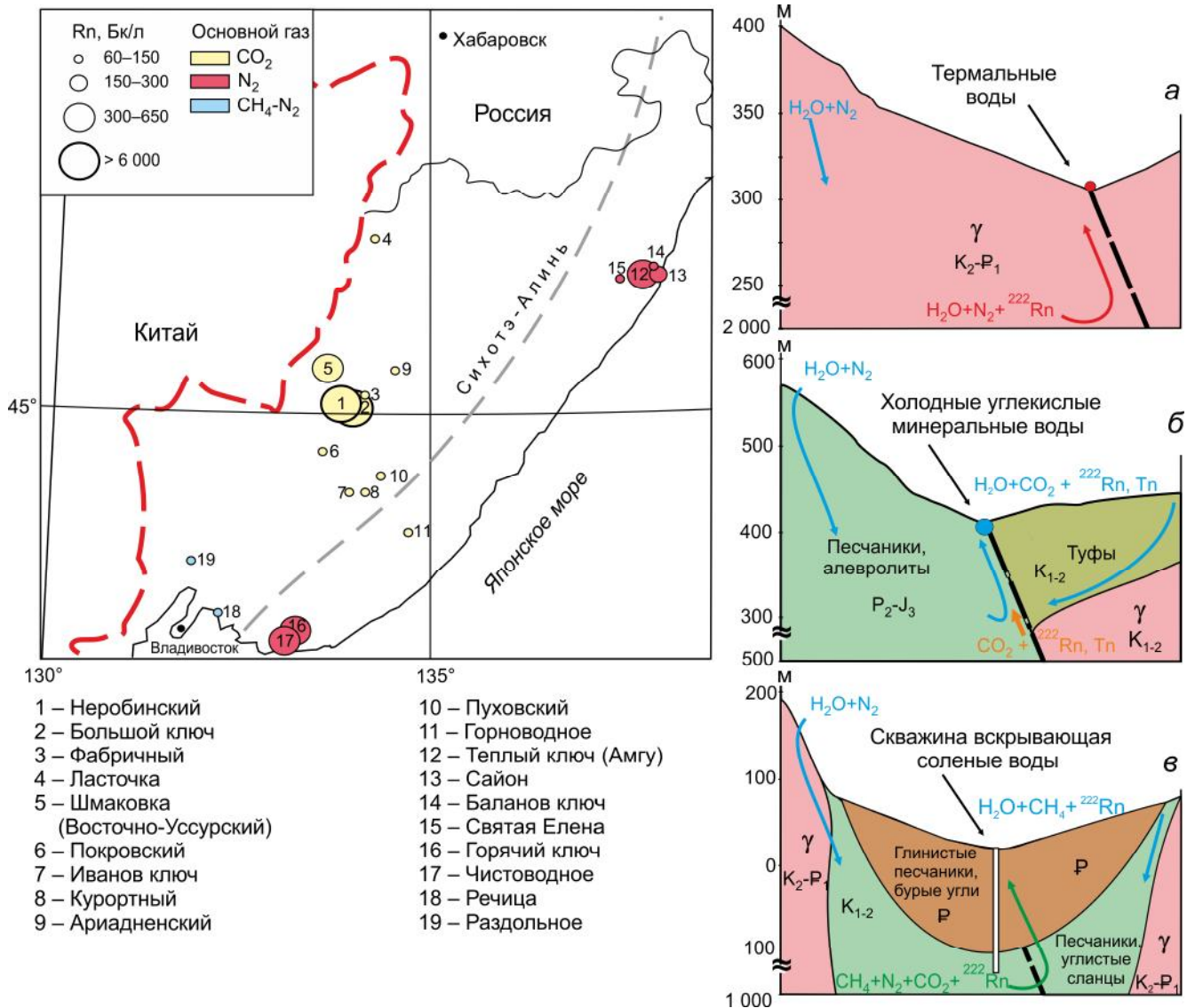


Рис. 5. Карта-схема распределения радона в водах минеральных источников Сихотэ-Алиня.

Основные схемы транспорта радона к поверхности: *а* – с водой и азотом в гранитных массивах; *б* – с углекислым газом от контактов с гранитными интрузиями; *в* – с метаном и азотом из осадочных отложений.

основных бальнеологических факторов их использования. На крупных месторождениях таких вод функционируют многочисленные курорты (Ходжа-Оби-Гарм (Таджикистан), Белокуриха (Алтайский край), Молоковка (Чита), Кульдур (ЕАО), Тумнин, Анненские (Хабароский край), Теплый ключ, Чистоводное и т.д.). Радон применяется в виде водных и воздушных ванн, душей, купаний в лечебных бассейнах, орошений, микроклизм и т.д. В радоновой воде короткоживущие продукты распада радона вызывают излучение, которое стимулирует соединительнотканые, эпителиальные и паренхиматозные клетки организма; влияет на функцию гипоталамо-гипофизарно-адре-

нальной и симпатико-адренальной систем; стимулирует гемодинамику и обмен биологически активных веществ (серотонин, гистамин, катехоламины и др.) и многое другое [3]. Минимально действующими лечебными концентрациями радона считаются: для водных ванн – 185 Бк/л, для питья – 4 000 Бк/л. Таким образом, лечебный фактор радона подтвердился на действующих лечебницах термальных вод Приморья. Вполне вероятно, что и «дикие термальные ванны» (№ 13, 14, 15) при правильном подходе и развитии могут показать более высокие концентрации радона. Для этого необходимо провести буровые и оценочные работы.

Некоторые холодные углекислые минеральные источники (№ 3, 7, 9) самостоятельно используются населением для приема ванн. Полученные данные показали, что с точки зрения радонотерапии это не оправдано из-за низкого содержания радона. Углекислые минеральные воды Приморья традиционно используются в питьевых целях. Риск для здоровья от потребления воды, с малым содержанием радона, невелик. Концентрации урана в воде намного ниже ПДК (15 мкг/л) для питьевых вод [15]. Основное воздействие радона из воды на человека связано с его ингаляционным поступлением. Но, в отличие от приема ванн, при приеме радоновой воды внутрь оценить уровень внутреннего облучения крайне сложно. В работе С.Н. Соколовской [18] указано, что при попадании внутрь организма радон и его дочерние изотопы, распадаясь, могут ионизировать биологические молекулы тканей, вблизи которых происходит распад или происходит радиолиз воды. Продукты распада могут быть токсичными, а изотопы свинца, попадая в кровь, не выводятся из организма. Авторы рекомендуют перед употреблением выдерживать радоновую воду в течение 10–15 часов, тем самым контролируя её активность. Именно поэтому, как и любой вид лечения, радонотерапия требует повышенного контроля со стороны врачей, и только под их постоянным наблюдением может принести положительные результаты. Предельно допустимое облучение больного (на курс лечения) составляет при приеме водных ванн концентрацией 34 кБк/л, воздушных – 9.4 кБк/л, при вдыхании радона и его продуктов – до 0.7 кБк/л, при питье радоновой воды – 2.7 МБк [3].

С геоэкологической точки зрения необходимо отметить, что в приземном воздухе в пределах Неробинского источника концентрации радона в более чем 100 раз превышает допустимые нормы для жилых помещений (200 Бк/м³). Поэтому рекомендуется не устанавливать палатки и не спать на земле, а также следует сократить время нахождения вблизи источника. Энергия альфа-частиц колеблется от 5.48 до 7.68 Мэв, что обуславливает их активное воздействие на биологические ткани внутренних органов человека, и при ОА радона – 8 000 Бк/м³ человеку в помещении находиться нельзя. Положительным в данном случае является то, что на территории Неробинского источника не имеется никаких надстроек и радиоактивный газ развеивается ветром. Замеры почвенного радона на расстоянии 50 метров от источника показали допустимые значения 100–136 Бк/м³.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили впервые оценить объемную активность радона в трех типах

термоминеральных вод Сихотэ-Алиня. Было установлено, что самые высокие содержания радона характерны для углекислых минеральных вод Шетухинской группы. Впервые, в дополнение к известным и используемым термальным радоновым водам Приморья, были выявлены три углекислых минеральных источника, содержащих радон в лечебных концентрациях.

На основании рассмотренных геологических условий и геохимических особенностей проявлений термоминеральных вод Сихотэ-Алиня были выделены факторы, определяющие уровень радиоактивности.

1. Для азотных термальных вод, где поступление радона происходит главным образом за счет диффузии из массивов кристаллических пород, основными факторами, отвечающими за концентрации радона, являются трещиноватость (проницаемость) и пористость.

2. Для проявлений холодных углекислых минеральных вод основным фактором, влияющим на концентрации радона, является совпадение областей генерации радона с потоком глубинных газов.

3. В азотно-метановых водах, где преобладает диффузионный перенос радона, тектонический (пористость и проницаемость) и газовый факторы, по всей видимости, оказывают равнозначное влияние.

Проведенные исследования показали, что, с одной стороны, юг Дальнего Востока России обладает потенциалом для расширения возможностей использования минеральных вод, а с другой, что территории с повышенной концентрацией радона могут являться серьезным источником дополнительного облучения.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-17-00245.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамчук Ю.В., Карпов Г.А., Максимовский В.А., Петрова Н.А. Содержание урана, тория и сопутствующих элементов (Pb, As, Hg, Bi, Rb, Sr) в породах и минеральных осадках действующей гидротермальной системы кальдеры Узон на Камчатке. М.: ЦНИИАтоминформ, 1986. 40 с.
2. Арбузов С.И., Рихванов Л.П. Геохимия радиоактивных элементов: учеб. пособие / Национальный исследовательский Томский политехнический ун-т. 2-е изд. Томск: Изд-во Томск. политехнич. уни-та, 2010. 310 с.
3. Бекман И.Н. Радиационная и ядерная медицина: физические и химические аспекты. Радиохимия. Т. 7.: Учеб. пособие. Щёлково, МО. 2012. 400 с.
4. Боголюбов В.М., Гусаров И.И. Итоги и перспективы развития радонотерапии в СССР // Вопросы курортологии и физиотерапии. 1981. № 1. С. 3.
5. Боголюбов А.Н., Корпляков О.П., Бенкевич Л.Г., Юденич В.С. Изотопы гелия в подземных водах Приморья // Геохимия. 1984. № 8. С. 1241–1244.
6. Брагин И.В., Челноков Г.А. Геохимия термальных вод Сихотэ-Алиня. Газовый аспект // Вестн. ДВО РАН. 2009. № 4. С. 147–151.

7. Гусаров И.И. Радонотерапия. М.: Медицина, (Библиотека практикующего врача). 2000. 199 с.
8. Иванов В.В., Невраев Г.А. Классификация минеральных вод. М.: Недра, 1964. 167 с.
9. Косьянчук О.Н. Возможность использования динамики эксхалации радона как надежного индикатора сейсмической активности // Молодой ученый. 2011. Т. 1, № 11 (34). С. 53–55.
10. Куликов Г.В., Жевлаков А.В., Бондаренко С.С. Минеральные лечебные воды СССР / Справочник. М.: Недра, 1991. 399 с.
11. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления. М.: ГЕОС, 2012. 348 с. (Труды Геологического Института. Вып. 599).
12. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федерал. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
13. Обжиров А.И., Гресов А.И., Шакиров Р.Б., Агеев А.А и др. Метанопроявления и перспективы нефтегазоносности Приморского края. Владивосток: Дальнаука, 2007. 167 с.
14. Паровик Р.И., Шевцов Б.М., Фирстов П.П. Модель переноса радона (^{222}Rn) в режиме супердиффузии во фрактальной среде // Докл. Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2008. Т. 10, № 2. С. 79–85.
15. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. М.: Федерал. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 11 с.
16. Пробоотборное устройство ПОУ – 04. Методика измерения объёмной активности ^{222}Rn в воде с помощью радиометра типа РРА. Государственная система обеспечения единства измерения. М., 2007.
17. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. Л.: Недра, 1974. 231 с.
18. Соколовская С.Н., Карпишевич Л.Г., Минько Н.П., Пономарев В.А. Изотопы радона и их использование при водолечении в санатории «Радон» // Медицинская реабилитация и санаторно-курортное лечение: Материалы Республиканской науч.-практ. конф. с международным участием. Гродно, 2017. С. 160–170.
19. Сычева А.А., Комарова Н.Л. Отчет о комплексном курортологическом обследовании Приморского и юго-восточной части Хабаровского краев, проведенном в 1959 г., 1961.
20. Уткин В.И., Юрков А.К. Радон – надежный индикатор геодинамических процессов // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. С. 165–169.
21. Харитоновна Н.А., Челноков Г.А., Брагин И.В., Вах Е.А. Изотопный состав природных вод юга Дальнего Востока России // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 2. С. 75–87.
22. Челноков Г.А., Харитоновна Н.А. Углекислые минеральные воды юга Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2008. 165 с.
23. Челноков Г.А., Харитоновна Н.А., Васильева М.К. Геохимия и генезис подземных рассолов северо-восточной части Уссурийского залива (Приморский край) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 4. С. 310–319.
24. Челноков Г.А., Харитоновна Н.А., Брагин И.В. Состав и генезис газов углекислых минеральных вод юга Дальнего Востока России // Изв. вузов. Геология и разведка. 2013. № 5. С. 42–46.
25. Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитоновна Н.А. Радон в газах Неробинского источника углекислых минеральных вод (Приморье) // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Междунар. конф. М., 2016. С. 706–709.
26. Челноков Г.А., Жарков Р.В., Брагин И.В. Гидрогеохимический мониторинг Синегорского месторождения и связь с сейсмическими событиями на о. Сахалин // Сб. трудов научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», Петровавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 311–317.
27. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 216 с.
28. Чудаев О.В., Харитоновна Н.А., Челноков Г.А., Брагин И.В. Гидроминеральные ресурсы Приморского края // Вестн. ДВО РАН. 2016. № 5. С. 11–20.
29. Чудаева В.А., Чудаев О.В., Челноков А.Н., Эдмундс М., Шанд П. Минеральные воды Приморья (химический аспект), Владивосток: Дальнаука, 1999, 160 с.
30. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е издание, исправл. и доп. М.: Недра, 1998. 366 с.
31. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Kharitonova N.A., Vysotsky S.V. Geochemistry of thermal waters of continental margin of Far East of Russia // Acta Geol. Sinica. 2016. V. 90, N 1. P.276–284.
32. Chelnokov G., Kharitonova N., Bragin I., Chudaev O.V. Geochemistry of mineral water and gases of the Razdolnoe Spa (Primorye, Far East of Russia) // Applied Geochem. 2015. V. 59. P.147–154.
33. Chelnokov G.A., Zharkov R.V., Bragin I.V. Radon monitoring in groundwater and soil gas of Sakhalin Island // J. Geosci. Environment Protection. 2015. V. 3, N 5. P. 48–53.
34. Girault F., Perrier F., The Syabru-Bensi hydrothermal system in Central Nepal. Part II. Modelling and significance of the radon signature // J. Geoph. Res.: Solid Earth. 2014. P. 4056–4086. DOI: 10.1002/2013JB010302
35. Nazaroff W.W. Radon transport from soil to air // Rev.Geophys. 1992. 30(2). P. 137–160.
36. Przylibski T.A. Shallow circulation groundwater – the main type of water containing hazardous radon concentration // Nat. Hazards Earth Syst. Sci.. 2011. 11. P. 1695–1703.
37. Richon P., Perrier F., Koirala B.P., Girault F., Bhattarai M., Sapkota S.N. Temporal signatures of advective versus diffusive radon transport at a geothermal zone in Central Nepal // J. environmental radioactivity 102 (2). P. 88–102.
38. Rogers V.C., Nielson K.K. Multiphase radon generation and transport in porous material // Health Physics 1991-A. 60(6). P. 807–815.

Рекомендована к печати О.В. Чудаевым

после доработки 02.12.2022 г.
принята к печати 23.01.2023 г.

G.A. Chelnokov, V.Yu. Lavrushin, I.V. Bragin, N.A. Kharitonova, K.Yu. Bushkareva, A.A. Pavlov, B.I. Chelnokova

Radon concentrations in mineral waters of the Sikhote-Alin, Primorsky Krai

Geological and hydrogeological conditions of 19 occurrences of thermomineral water in the southern Far East of Russia are considered in the paper. Concentrations of radon were measured in waters and those of uranium and thorium in host rocks and secondary minerals. The results were compared with the chemical composition of waters and gases in the mineral springs. It is established that water-bearing rocks are classified into rocks of low and normal radioactivity. The contents of uranium ($< 0.56 \mu\text{g/l}$) and thorium ($< 0.1 \mu\text{g/l}$) in the waters are low. Measurements of radon concentration in mineral water springs occurring in Primorye indicate that most of them are weakly radioactive (0.2–1.5 kBq/l), whereas two are moderately radioactive (1.5–7.5 kBq/l). From a medical-balneological point of view, waters in 7 out of 19 springs were defined as radon waters, with four of them classified as nitrogen thermal water and three as CO₂-rich mineral water. CO₂-rich mineral waters of the Shetukhinskaya group exhibit the highest level of radioactivity. Such nature-made objects reflect the state of the geological environment and can be utilized both for medical purposes and for monitoring a wide range of hydrogeochemical parameters. Based on the analysis of geological conditions and geochemical features of thermomineral water occurrences, the factors that determine the level of radioactivity were identified and general schemes were proposed for the transport of radon to the surface in various geological and hydrogeological conditions.

***Key words:* mineral waters, radon, uranium, thorium, thermal waters, CO₂-rich mineral waters, Sikhote-Alin.**