

УДК 550.361

ИЗОТОПЫ ГЕЛИЯ И ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК КАК ОТРАЖЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ (ЦЕНТРАЛЬНО-ТУВИНСКАЯ КОТЛОВИНА, ОЗ. ДУС-ХОЛЬ)

Лебедев В.И., Рычкова К.М., Монгуш С-С.С.

ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов» СО РАН, Кызыл,
e-mail: tikopr@mail.ru

Озеро Дус-Холь находится в Центрально-Тувинской котловине, входящей в межгорный Тувинский прогиб на юго-востоке Алтае-Саянской складчатой области. Изотопное отношение гелия (R) источников оз. Дус-Холь превышает фоновое для пород фундамента и составляет в среднем $69 \cdot 10^{-8}$. Значения R превышают таковые в термоминеральном источнике Уш-Бельдыр ($54 \cdot 10^{-8}$), расположенном в сейсмогенерирующем Билин-Бусийнгольском грабене. Глубинные продукты в среднем представлены коровым гелием на 88,7%, гелием мантии на 5,3%. Высокое содержание изотопного отношения гелия, наличие мантийной составляющей однозначно указывают на проявления скрытого тепломассопотока, т.к. поверхностные проявления кайнозойского вулканизма в Центральной Туве не выделены. Содержания гелий-неонового отношения и водорастворенного гелия значительно превышают соответствующие атмосферные. Это свидетельствует о глубинном характере полученных величин. Измерения после землетрясений показали возросшие величины гелий-неонового отношения и водорастворенного гелия в среднем в 5–6 раз. При этом сейсмоTECTONические события не повлияли на величину изотопов гелия, что говорит о региональном характере распределения R.

Ключевые слова: Центрально-Тувинская котловина, подземные флюиды, изотопы гелия, общий гелий, мантийный гелий, глубинные разломы, тепловой поток, напряженно-деформированное состояние земных недр

HELIUM ISOTOPES AND HEAT FLOW AS A REFLECTION OF MODERN SEISMOTECTONIC ACTIVITY (CENTRAL TUVA BASIN, OZ. DUS-KHOL)

Lebedev V.I., Rychkova K.M., Mongush S-S.S.

Tuvinian Institute for the Exploration of Natural Resources Russian Academy
of Sciences Siberian Branch, Kyzyl, e-mail: tikopr@mail.ru

The lake Dus-Khol is located in the Central basin of Tuva, the Tuva part of intermountain trough in the South-Eastern part of the Altai-Sayan region. The ratio of helium isotopes (R) lake source. Dus-Khol exceeds the background for the basement rocks and an average of $69 \cdot 10^{-8}$. The values of R are higher than in thermal mineral springs ush-Beldir ($54 \cdot 10^{-8}$), located in bilin Busiyngolskom seismogenic Graben. Deep the products presented in average crustal helium at 88,7% mantle helium is 5,3%. The high level of the isotope ratios of helium, the presence of a mantle component clearly indicate teplomassopotoka hidden behind the surface manifestations of Cenozoic volcanism in Central Tuva is not highlighted. The ratio of the content of helium-neon and helium significantly exceeds atmospheric water. It shows the profound nature of values received. Measurements showed that increased after the earthquake of a magnitude relationship of helium-neon and helium-water average 5–6 times. At the same seismotectonic events does not affect the number of isotopes of helium, which indicates the regional nature of the distribution of R.

Keywords: Central Tuva Basin, underground fluids, helium isotopes, the total helium, mantle helium, deep faults, heat flow, the stress-strain state of the Earth's interior

Для уточнения и распределения теплового потока на территории Тувы был использован косвенный метод по изотопно гелиевому отношению в минеральных источниках. Он позволил существенно улучшить геотермическую изученность Тувы на востоке Тувы, где проявлена позднекайнозойская тектоно-магматическая активность. В Центральной Туве оценить тепловой поток по изотомам гелия не получилось, т.к. практически все источники формируются в зоне верхнего активного водообмена и не несут глубинной компоненты. Исключение составили источники оз. Дус-Холь, где косвенные оценки теплового потока значительно превышают измеренные в скважинах.

В предлагаемой статье рассматриваются причины несоответствия косвенных и прямых оценок теплового потока

Цель исследования

Тепловой поток – одна из важнейших физических характеристик глубинных недр. Первые геотермические измерения теплового потока в скважинах Центральной и Западной Тувы на 7 участках показали его низкое значение в среднем 41 при вариациях от 33 до 50 мВт/м² [6]. На северо-востоке и востоке Тувы в двух пунктах по измерениям в скважинах были определены высокие оценки q_T от 60 до 74 мВт/м². Неразбуренность территории затормозила дальнейшее

изучение распределения теплового потока, поэтому нами был использован изотопно-гелиевый метод [5]. Региональные вариации значений изотопов гелия (${}^3\text{He}/{}^4\text{He} \sim R$) подземных флюидов совпадают с вариациями теплового потока, т.к. тепло и гелий из мантии поступают в земную кору согласованно. Зависимость между ними выражена уравнением: $q = 18,231 \lg({}^3\text{He}/{}^4\text{He}) + 181,82$ [4]. Исследования изотопов гелия в минеральных источниках позволили уточнить и расширить представления о тепловом режиме Прихубсугуля, Хангая, Байкальской рифтовой зоны. В настоящее время косвенный метод определения теплового потока широко применяется во всем мире.

Для Восточной Тувы на данный момент получено 18 значений высокого теплового потока в среднем 73 мВт/м^2 , рассчитанных по изотопам гелия и идеально совпадающих с измеренными в скважинах в трех пунктах на северо-востоке и юго-востоке. Полученные значения q_R подтверждают и свидетельствуют о значительной погрешности земных недр на востоке. В Западной и Центральной Туве определить тепловой поток q_R по изотопам гелия не удалось. Источники этой территории формируются в зоне активного водообмена; изотопное отношение гелия не содержит глубинной компоненты и представлено атмосферной составляющей, за исключением двух пунктов: источники – Шуйский и Дус-Холь. Высокие значения изотопов гелия источников оз. Дус-Холь не отвечают измеренному низкому q_T в этом районе.

По измерениям 2013–2014 гг. выявлено двухкратное возрастание гелий-неонового отношения и вариативные до аномальных значения общего гелия; при этом величина отношения изотопов гелия оставалась постоянной. В предлагаемой статье рассматриваются результаты изотопно-гелиевых исследований источников оз. Дус-Холь как показателей сейсмотектонической активности Центрально-Тувинской впадины.

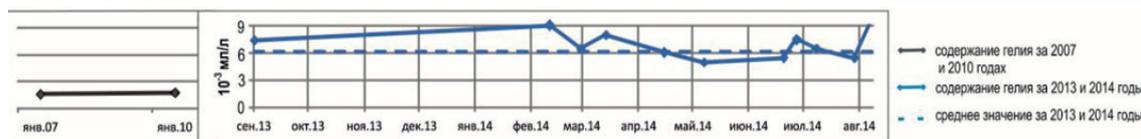
Материалы и методы исследования

Рассматриваемый район расположен в Центрально-Тувинской котловине на границе Тувинского прогиба, ограниченного с северо-востока и юга отрогами хр. Восточный Танну-Ола. Породы прогиба представлены вулканогенно-осадочными толщами палеозоя. С юга Тувинский прогиб ограничен тектонической зоной, проходящей параллельно хребту Восточный Танну-Ола. По мнению многих исследователей, Восточный Танну-Ола геоморфологически сравнительно молодое образование, которое на первоначальном этапе характеризовалось активными блоковыми движениями, захватывающими и Тувинский прогиб. На современном этапе Восточный Танну-Ола выделяется стремитель-

ным поднятием с глубоким эрозийным расчленением, в то время как Тувинский прогиб испытывает опускание. Разнонаправленные движения двух соседних структур разграничены тектонической зоной, проходящей вдоль северных склонов хребта. Активные движения в Тувинском прогибе связаны с блоковыми перемещениями фундамента, которые во многих случаях происходили в результате обновления разломов, существовавших на более ранних этапах развития территории. В результате этих движений сформировались депрессии, к которым относится и оз. Дус-Холь. Преобладают разломы северо-западного и северо-восточного направления с преобладанием круто-наклонных и вертикальных, доходящие до среднепалеозойского фундамента. Работами Гидрогеологической партии Института курортологии и физиотерапии выявлена глубокая циркуляция подземных вод, которая «...весьма заметно увеличивается в зонах тектонических нарушений Тувинской котловины» [3]. По результатам комплексных геолого-геофизических исследований установлено, что Центрально-Тувинская котловина характеризуется сменой блоков с резко изменяющимися скоростными параметрами, свидетельствующими о повышенной сейсмической активности; на глубине 35–40 км выделены аномалии суммарной электрической проводимости. Авторы этой работы предполагают «...вздымание корово-мантийной границы до 35–40 км» [7].

Зимой 2011–2012 гг. на хр. Академика Обручева произошли землетрясения. Они находились в 150 км к северо-востоку от источников оз. Дус-Холь. По данным КНИИГиМС и ЦМЭИ ЧС РТ первое сильное событие, произошедшее 27 декабря 2011 г., имело $M_s = 6,0$. Расчётная интенсивность в эпицентре составила $I_0 = 8$ баллов. Второе, случившееся 26 февраля 2012 г., имело $M_s = 6,4$. Расчётная интенсивность в эпицентре – $I_0 = 8$ баллов. Глубины гипоцентров обоих событий составили 10 км.

Два источника оз. Дус-Холь, Восточный и Западный, расположены в прибрежной зоне озера на восточном и юго-западном бортах на расстоянии около 700 м. Они вытекают из юрских песчаников, залегающих несогласно на средне-верхнепалеозойских гранитах. Мощность отложений юрского возраста, достигающая максимальных 1,5 км в центральной части Тувинской котловины, в районе оз. Дус-Холь участками выклинивается. Источники приурочены к скрытому глубинному разлому север-северо-западного простирания. Озеро бессточное, находится на высоте 700 м над уровнем моря. Восточный источник негазирующий. В газовой фазе Западного источника содержится до 80% азота, кислорода – до 18 и углекислого газа до 3%; температура в обоих источниках не превышает 3 °С. Пробы на изотопы гелия отбирались согласно общепринятой методике. Анализ проб производился в лаборатории геохронологии и геохимии изотопов Геологического института КНЦ РАН (г. Апатиты). Измерения изотопного отношения гелия в 2007, 2010 и 2013, 2014 гг. показали устойчивость этой величины во времени. Постоянство высоких содержаний отношения изотопов гелия на протяжении 7 лет указывает на возможность суждений о региональных закономерностях в распределении значений R [4]. Был проведен отбор проб на общий гелий в 2013 г. с интервалом в 20 дней. Пробы анализировались в Иркутске и Новосибирске на приборе ИНГЕМ-1 (индикатор гелия магниторазрядный). Получено 15 результатов по определению водоразводного гелия.



Аномальные вариации водорастворенного гелия

Изотопное содержание гелия и его составляющих

№ п/п	Название источника	Год, тип флюида	$R_{\text{изм}} \cdot 10^{-8}$	${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$	$\text{He}_{\text{общ}} \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{см}^3$	$\text{He}_{\text{общ}} 10^{-4}$ мольн	$R_{\text{исп}}$	$\text{He}_{\text{м}} \%$	$\text{He}_{\text{к}} \%$	$\text{He}_{\text{а}} \%$
1	Восточный	2007 водн	65	11,9	160		65	5	93	2
2*	Восточный	2010 водн	82,8	10,1	174		81			
3	Восточный	2013 водн	62	25	741		61	5	94	1
4	Западный	2013 водн	76	22	617		75	6	93	1
5	Западный	2013 газ	71	3,8		56 ppm	65	5	88	7
6	Западный	2013 газ	76	2,5		41ppm	67	5	84	11
	Восточный	2014 в	60	54	980		60	5	83	12
	Западный	2014 водн	76	36	778		75	6	86	8
Среднее по источникам оз. Дус-Холь							69	5,3	88,7	6
Средний тепловой поток q_R равен 70 мВт/м ²										

Примечание. * – значение не принималось во внимание при расчете $R_{\text{исп}}$.

В результаты измерений ($R_{\text{изм}}$) вводилась поправка ($R_{\text{испр}}$), указывающая на истинную величину изотопного отношения гелия в глубинном газе. Как оказалось, практически для всех проб $R_{\text{изм}}$ равна $R_{\text{испр}}$. Это говорит о глубинном происхождении гелия проб и о слабом заражающем влиянии атмосферы.

Результаты исследования и их обсуждение

Измерения изотопов гелия источников Восточный и Западный в 2007, 2010, 2013, 2014 гг. показали постоянные и высокие значения $R = (60 - 76) \cdot 10^{-8}$ при фоновом для палеозоя, равном $\sim 10 \cdot 10^{-8}$ (таблица).

При этом значения R несколько превышают таковые в термоминеральном источнике Уш-Бельдыр ($54 \cdot 10^{-8}$), расположенном в сейсмогенерирующем Билин-Бусийнгольском грабене. Содержания гелий-неонового отношения, варьирующие от 10 до 54, также значительно превышают атмосферное, равное 0,3. Глубинные продукты в среднем представлены коровым гелием на 88,7%, гелием мантии на 5,3%; атмосферной составляющей на 6%.

Содержание мантийного гелия остается постоянным (5%) на протяжении всего периода 2007–2014 гг. Сейсмотектонические события не повлияли на величину изотопов

гелия, что говорит о региональном характере распределения R . Высокое содержание изотопного отношения гелия, наличие мантийной составляющей однозначно указывают на проявления скрытого тепломагнетосопотока, т.к. поверхностные проявления кайнозойского вулканизма в Центральной Туве не выделены.

Высокие содержания водорастворенного гелия в $160 \cdot 10^{-5}$ мл/л при фоновом атмосферном $5,2 \cdot 10^{-5}$ мл/л определены в 2007 году. В 2013 г. выявлены и продолжаются в настоящее время аномальные вариации этого элемента от 617 до $980 \cdot 10^{-5}$ мл/л (рисунок).

Общеизвестно, что гранитные массивы содержат низкие концентрации гелия, а повышенные его концентрации характерны для глубинных разломов, причем максимумы концентраций наблюдаются в местах пересечений последних [9]. Высокие содержания гелия указывают на наличие узла пересечения глубинных разломов, а его увеличение до аномальных свидетельствует о повышении проницаемости и флюидонасыщенности, об увеличении дегазации подземных флюидов из низов коры после землетрясений 2011–2012 гг. Полученные данные подтвержда-

ют, что водорастворенный гелий является одним из самых надежных и чувствительных индикаторов сейсмодинамических изменений земной коры.

Рассчитано [10], что при гелий-неоновом отношении ($^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$) более 10 возраст воды исчисляется тысячу и более лет. В наших пробах это содержание, измеренное в 2007 г., составило 10,1–11,6. Поэтому воде источников оз. Дус-Холь тысяча и более [2], а по данным [3] до миллиона лет. Во всяком случае, воды источников довольно «древние», что позволило им набрать глубинные компоненты. Гелий-неоновое отношение в 2007 и 2010 гг. осталось практически постоянным (10,1 и 11,9), а в 2013 г. оно увеличилось до 22–25, что свидетельствует об «удревнении» воды после землетрясений. Увеличение гелий-неонового отношения и водорастворенного гелия свидетельствует о более глубокой дегазации, об усилении миграции глубинных флюидов после землетрясений 2011–2012 гг. Вследствие землетрясений узел разлома, выводящий источники, был обновлен, произошли подвижки и увеличилась проницаемость, что привело к увеличению потока флюидов.

Приведенные данные свидетельствуют о высокой чувствительности указанных компонентов подземных флюидов источников оз. Дус-Холь на землетрясения 2011–2012 гг.

Измерения в скважинах Центрально-Тувинской котловины дают величину теплового потока (q_T) в среднем 40–44 мВт/м² [1]. Это значение хорошо соответствует раннекаледонскому возрасту складчатого фундамента прогиба. Тепловой поток (q_R), рассчитанный по изотопам гелия, в источниках оз. Дус-Холь намного выше и составляет 70 мВт/м² (таблица). Полученная величина q_R отражает тепломассоперенос, приуроченный к проницаемому узлу в породах фундамента. Землетрясения 2010–2011 гг. увеличили проницаемость узла, что повлекло дегазацию подземных флюидов из низов коры; увеличение глубинных коровых компонентов: общего гелия и гелий-неонового отношения, но при этом содержания отношений изотопов гелия, следовательно мантийного гелия и теплового потока остались на прежнем уровне. Это указывает на глубинный тепломассоперенос, на наличие глубинной магматической активности.

Известно, что в тектонически подвижных прогибающихся структурах значения q_T намного меньше q_R , т.к. на величину те-

плогового потока, измеренного в верхней части, оказывают влияние тектонические процессы и активная циркуляция подземных вод, уменьшающие его величину [4, 8]. По геолого-геофизическим характеристикам Центрально-Тувинская котловина является тектонически подвижной прогибающейся структурой с повышенной сейсмической активностью. Об этом говорит ее блоковое строение с резко изменяющимися скоростными параметрами, наличие на глубине 35–40 км аномалий суммарной электрической проводимости, глубокая циркуляция подземных вод, которая «...весьма заметно увеличивается в зонах тектонических нарушений». На величину изотопов гелия, а следовательно, и на q_R тектонические движения не влияют, поэтому рассчитанная величина в 70 мВт/м² в источниках оз. Дус-Холь осталось постоянной и отвечает глубинному тепловому потоку не только в этом пункте, но и имеет региональный характер.

Заключение

1. Установлена высокая чувствительность подземных флюидов источников оз. Дус-Холь на изменение напряженно-деформированного состояния земных недр.

2. Выявленные аномальные вариации водорастворенного гелия свидетельствуют о наличии узла пересечения глубинных разломов, обновлении и активизации после землетрясений 2011–2012 гг.

3. Исследования изотопных отношений гелия позволили определить глубинные компоненты в источниках оз. Дус-Холь, установить наличие скрытого тепломассопотока.

4. Причиной некоррелируемости значений q_R и q_T в районе оз. Дус-Холь является сейсмотектоническая активность Центрально-Тувинской котловины.

5. Флюидонасыщенность, высокая проницаемость, сопряженность глубинных разломов, идущих на значительную глубину, повышенная сейсмическая активность указывает на неустойчивое напряженно-деформированное состояние литосферы Центрально-Тувинской котловины и диктует необходимость изучения зон повышенной проницаемости, прослеживания активности геодинамических процессов, мониторинговые наблюдения индикаторов сейсмической активности Тувы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (р_Сибирь_а_№ 13-05-98058).

Список литературы

1. Дучков А.Д., Рычкова К.М. Аюнов Д.Е. Тепловой поток Центрально-Тувинской котловины // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Азии. Геоэкология природной среды и общества. – Кызыл: Тув ИКОПР СО РАН. – 2012. – С. 46–52.
2. Каменский И.Л., В.И. Скиба. Возраст воды родников Тувы и Алтайского края // Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 80-летию кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Томского политехнического университета // под ред. С.Л. Шварцева. – Томск: Изд-во НТЛ. – 2011. – С. 720.
3. Отчет Комплексной гидрогеологической партии «ГЕОМИНВОД» Института курортологии и физиотерапии. Гидрогеологическое обоснование возможности и выведения минеральных вод для бальнеологического использования в пределах Тувинской котловины. – М., 1970.
4. Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. – М.: «Наука», 1988. – С. 192.
5. Рычкова К.М. Тепловой поток территории Тувы по изотопно-гелиевым и геотермическим данным: дис...к. г-м. н.: Специальность 25.00.10. – Новосибирск, 2009. – С. 117.
6. Тепловое поле недр Сибири // Э.Э. Фотиади (ред.) / Новосибирск: Наука. – 1987. – С. 185.
7. Тойб Р.Е., Мищук О.В., Михайленко В.Г., Кириленко В.А. Комплексные геолого-геофизические исследования глубинного строения и сейсмичности Алтае-Саянской складчатой области: методика, результаты, прогноз // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири. – Красноярск: КНИИГиМС, 2004. – С. 172–186.
8. Хуторской М.Д. Геотермия Центрально-Азиатского складчатого пояса. – М.: Изд-во Росс. ун-та др-бы нар-ов, 1996. – С. 289.
9. Янитский И.Н. Гелиевая съемка. – М.: «Недра», 1979. – 96 с.
10. Kamensky I.L., Tokarev I.V., Tolstikhin I.N. $^3\text{He}/^4\text{He}$ dating: A case for mixing of young and old groundwaters // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1991. – V. 55. – P. 2895–2899.