



предложен подход с максимальной детализацией точек наблюдения на объекте за физическим воздействием и геохимическими показателями, с последующим внесением результатов в базу данных мониторинга. Постепенно формирующийся банк знаний поз-

воляет развивать направление по изучению и картографированию состояния как ландшафтов в целом, так и их отдельных природных компонентов.

*Статья поступила 10.11.2014 г.*

#### Библиографический список

1. Плюснин В.М. и др. Географические исследования Сибири. Структура и динамика геосистем. Новосибирск: Изд-во "Гео", 2007. Т. 1. 452 с.
2. Абалаков А.Д. и др. Территориальная организация Забайкальского национального парка. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2003. 125 с.
3. Абалаков А.Д. и др. Геоэкологические основы организации научно-учебного полигона на особо охраняемых природных территориях: Забайкальский национальный парк. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. 147 с.
4. Abalakov A.D. and others. Recreational Utilization of the Fauna: Transbaikalian National Park. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 142 p.
5. Седых С.А. и др. Программа организации геоинформационного экологического мониторинга туристско-рекреационного комплекса Забайкальского национального парка // Российский журнал устойчивого туризма. 2011. № 1. С. 26–33.

УДК 550.348.64(571/55)

### ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЮЖНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ В СВЯЗИ С ПОИСКАМИ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© Р.М. Семенов<sup>1</sup>, П.С. Бадминов<sup>2</sup>, М.Н. Лопатин<sup>3</sup>, А.И. Оргильянов<sup>4</sup>, И.Г. Крюкова<sup>5</sup>

<sup>1,3</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения,

664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

<sup>1,2,4,5</sup>Институт земной коры СО РАН,

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

Рассмотрен метод прогноза землетрясений, основанный на изучении вариаций содержания растворенного гелия в глубинной воде Байкала. С целью повышения достоверности результатов предложено включение в обработку данных, получаемых не с одного, а с трех пунктов гидрогеохимических наблюдений в Южном Прибайкалье.

*Ключевые слова:* гидрогеохимические исследования; растворенный в глубинной воде гелий; очаг землетрясения; энергетический класс землетрясения; условная энергетическая характеристика.

### HYDROGEOCHEMICAL INVESTIGATIONS IN THE SOUTHERN BAIKAL REGION DUE TO THE SEARCH FOR EARTHQUAKE PRECURSORS

R.M. Semenov, P.S. Badminov, M.N. Lopatin, A.I. Orgilyanov, I.G. Kryukova

Irkutsk State University of Railway Engineering,

15 Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russia.

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

The paper treats the method of earthquake prediction based on the study of dissolved helium variations in deep waters of the Lake Baikal. In order to improve the reliability of obtained results it is proposed to process observation data from three rather than from one station of hydrogeochemical observations in the Southern Baikal region.

*Keywords:* hydrogeochemical studies; helium dissolved in deep water; earthquake focus; earthquake energy class; conditional energy characteristic.

<sup>1</sup>Семенов Рудольф Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЗК СО РАН, профессор ИргУПС, тел.: 89086607683, e-mail: semenov@crust.irk.ru  
Semenov Rudolf, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Engineering Seismology and Seismic Geology of the Institute of the Earth's Crust SB RAS, Professor of Irkutsk State University of Railway Engineering, tel.: 89086607683, e-mail: semenov@crust.irk.ru

<sup>2</sup>Бадминов Прокопий Сократович, ведущий инженер лаборатории гидрогеологии, тел.: 89025139137, e-mail: prokop\_sbada@mail.ru.

Badminov Prokopy, Leading Engineer of the Hydrogeology Laboratory, tel.: 89025139137, e-mail: prokop\_sbada@mail.ru

<sup>3</sup>Лопатин Максим Николаевич, аспирант, тел.: 89041369108, e-mail: flamewolf@mail.ru

Lopatin Maxim, Postgraduate, tel.: 89041369108, e-mail: flamewolf@mail.ru

<sup>4</sup>Оргильянов Алексей Юльевич, главный специалист лаборатории гидрогеологии, тел.: 89027666075, e-mail: irig@crust.irk.ru

Orgilyanov Aleksei, Chief Specialist of the Hydrogeology Laboratory, tel.: 89027666075, e-mail: irig@crust.irk.ru

<sup>5</sup>Крюкова Ирина Георгиевна, ведущий инженер лаборатории гидрогеологии, тел.: 89027673097, e-mail: irig@crust.irk.ru.

Kryukova Irina, Leading Engineer of the Hydrogeology Laboratory, tel.: 89027673097, e-mail: irig@crust.irk.ru



### Введение

Установлено, что зарождение и реализация очагов землетрясений оказывают влияние на изменение химического и газового составов подземных вод. При этом их предсейсмические вариации часто являются предвестниками времени возникновения землетрясений. Возникновение этих вариаций, на наш взгляд, объясняется моделью подготовки и реализацией очага землетрясения. Из многих существующих в настоящее время моделей очагов для Южного Прибайкалья, характеризующегося развитием рифтогенного процесса, наиболее приемлемой является дилатантно-диффузная (ДД) модель (рис. 1).



Рис. 1. Схема дилатантно-диффузной модели подготовки очага землетрясения

### Модель очага землетрясения

На основании модели подготовка и реализация очага землетрясения и связанных с ними изменений концентраций растворенных в воде газов в подземных водах объясняются следующим образом.

На первой стадии развития (см. рис. 1), в связи с возрастанием тектонических напряжений в земной коре, в некотором объеме водонасыщенных горных пород происходит формирование многочисленных микротрещин, которое сопровождается ультразвуковыми колебаниями от долей герца до 10–30 кГц. Распространение этих колебаний приводит к ослаблению адсорбционных сил, удерживающих газ на стенках пор и пустот внутри пород, десорбции эманаций и переходу «связанного» газа в свободный. Кроме того, ультразвуковые колебания, проходя через обводненные горные породы, ускоряют диффузионный процесс выделения газов и обогащают водную фазу газами. Именно в это время отмечаются повышенные концентрации гелия в подземных водах.

На второй стадии напряжения достигают предела прочности горных пород, в результате чего возникают трещины отрыва, увеличивается объем горных пород и в верхней части земной коры образуется зона трещинной дилатансии. Горная порода при этом относительно осушается, внутривещное давление падает, и прочность породы повышается.

На третьей стадии в образовавшиеся трещины мигрируют большие массы флюидов вместе с растворенными в них газами. По-видимому, именно в это время происходит резкое уменьшение содержания газов в подземных водах.

На четвертой и пятой стадиях при дальнейшем повышении напряжений мелкие трещины группируют-

ся в магистральный разрыв, с которым связаны: возникновение землетрясения, резкое выделение из пор и трещин растворенных газов и повышение их содержания в подземных водах.

На шестой стадии землетрясение сопровождается многочисленными афтершоками. Происходит снижение тектонического напряжения, уплотнение пород, закрытие трещин, и, следовательно, восстанавливается прежний режим выхода газов, вследствие чего их содержание приходит к своим фоновым значениям.

### Гидрогеохимические исследования

Из всех компонентов газового состава природных вод наиболее подходящими в качестве гидрогеохими-

ческих предвестников землетрясений являются гелий и радон. Оба элемента – продукты радиоактивного распада урана (U) и тория (Th). Однако тяжелый и мало живущий радон (с периодом полураспада 3,8 дня) накапливается только в непосредственной близости от источника своего образования, тогда как легкоподвижный и стабильный гелий рассеивается в виде широкого ореола на значительное расстояние и создает повышенный фон в местах миграции флюидов по зонам тектонических нарушений. Как правило, подземные воды зоны активного водообмена характеризуются низкими фоновыми содержанием гелия. Поэтому наблюдения за вариациями гелия велись не только в глубинных водах Байкала (Листвянка, Сухой Ручей), но и в термальной воде скважины Сухая, вскрывшей фундамент Усть-Селенгинской депрессии.

Для измерения содержания растворенного гелия в пробах, отбираемых по стандартной методике, используется прибор ИНГЕМ-1 (индикатор гелия магниторастворимый).

Именно по сценарию дилатантно-диффузной модели подготовки очага землетрясения происходило изменение концентраций растворенного гелия в подземных водах Байкала накануне Култукского землетрясения. Таким образом в Южном Прибайкалье были выявлены краткосрочные предвестники сильного землетрясения 2008 г.

Как показали наблюдения за содержанием гелия в подземных водах, на концентрацию гелия могут также влиять и другие факторы, среди которых выделяются «астрономически точные» – приливные процессы, «менее точные» – сезонные колебания и «весьма случайные» – колебания, связанные с изменением погоды. Но эти факторы, как правило, вызывают кратко-



срочные изменения в концентрациях гелия, выражающиеся в их единичных отклонениях в сторону повышения или понижения значений содержания. Колебания концентраций, связанные с вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры, обычно продолжаются в течение определенного времени. В отличие от приливных, сезонных и других факторов, они характеризуются закономерностями, зависящими от величины очага и, следовательно, от энергии готовящегося подземного толчка и эпицентрального расстояния до пункта наблюдения.

Возникает естественный вопрос: какова должна быть интенсивность сейсмического воздействия в пункте гидрогеохимических наблюдений для того, чтобы происходило изменение концентраций растворенного гелия в воде?

По мнению В.Л. Барсукова и его коллег, изменение газового состава подземных вод при сейсмических воздействиях может происходить в том случае, если условная энергетическая характеристика землетрясения в пункте гидрогеохимических наблюдений составляет  $K' > 5$ .

Рассчитывается она следующим образом:

$$K' = K - A \lg R,$$

где  $K'$  – условная энергетическая характеристика;  $K$  – энергетический класс землетрясения (десятичный логарифм энергии);  $A$  – специально подобранный численный коэффициент, равный 2,5;  $R$  – расстояние от эпицентра землетрясения до точки наблюдения, км.

По нашим наблюдениям, на территории Южного

Прибайкалья изменения газового состава подземных вод при сейсмических воздействиях часто фиксируются именно при величине условной энергетической характеристики в пункте наблюдения  $K' \geq 5$ . На основании этих данных нами были рассчитаны эпицентральные расстояния, на которых землетрясения определенных энергетических классов способны проявиться с  $K' \geq 5$  в пункте гидрогеохимических наблюдений (табл. 1). Так, при энергетическом классе  $K = 15,9$  Култукского землетрясения и эпицентрального расстоянии 62 км, условная энергетическая характеристика в пункте гидрогеохимических наблюдений (пос. Листвянка) составила  $K' = 11,4$ .

Известно, что более надежные гидрогеохимические предвестники землетрясений получаются в том случае, если наблюдения в эпицентральных областях ведутся не на одном, а на нескольких пунктах. В этом случае, на наш взгляд, будут учитываться только сейсмические эффекты и исключаться различные природные факторы, влияющие на изменения концентраций гелия в подземных водах. Именно поэтому мы расширили территорию гидрогеохимических наблюдений в Южном Прибайкалье. С мая 2014 г. были установлены постоянные наблюдения в пункте Сухая, расположенном на восточном берегу Байкала севернее дельты р. Селенги, а с августа – режимные наблюдения в пункте Сухой Ручей, расположенном на южном берегу Байкала близ г. Слюдянки (рис. 2).

Таблица 1

**Эпицентральные расстояния землетрясений различных энергетических классов, при которых их условная энергетическая характеристика в пункте гидрогеохимических наблюдений составит  $K' \geq 5$**

Энергетический класс землетрясения, $K$	Максимальное эпицентральное расстояние (км), на котором условная энергетическая характеристика землетрясения в пункте наблюдения будет $K' \geq 5$	Энергетический класс землетрясения, $K$	Максимальное эпицентральное расстояние (км), на котором условная энергетическая характеристика землетрясения в пункте наблюдения будет $K' \geq 5$
9	40	9,5	60
10	100	10,5	160
11	250	11,5	400
12	630	12,5	1000
13	1600	13,5	2500

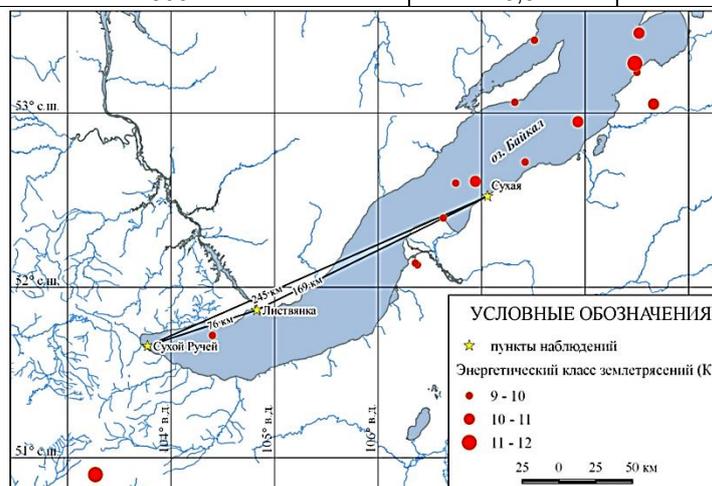


Рис. 2. Схема расположения пунктов гидрогеохимических наблюдений в Южном Прибайкалье



В пункте Сухой Ручей отбор проб глубинной воды Байкала ведется с глубины 400 м на расстоянии 1700 м от берега. В пункте Сухая пробы отбираются из скважины глубиной 278 м, пробуренной на береговой полосе озера, вскрывающей напорные высокотемпературные воды.

Расстояния между пунктами наблюдений следующие: Листвянка–Сухой Ручей – 76 км, Листвянка–Сухая – 169 км, Сухой Ручей–Сухая – 245 км. При этом все три пункта расположены вдоль Байкала в полосе шириной 70 км, вытянутой в северо-восточном направлении на расстояние 250 км. Учитывая энергетический класс землетрясений и их эпицентральные расстояния от пунктов наблюдений (см. табл. 1), легко рассчитать условную энергетическую характеристику для каждого пункта, а также выделить те землетрясения, которые проявились в одном, двух или во всех трех пунктах с  $K' \geq 5$  (табл. 2).

Так, при землетрясении 01.09.2014 г. ( $K = 11,5$ ), с эпицентральным расстоянием 90 км от пункта Сухой Ручей, условная энергетическая характеристика в пункте наблюдения составила  $K' = 6,6$ , а в Листвянке, на расстоянии 152 км от эпицентра, –  $K' = 5,9$ . В пункте наблюдения Сухая, удаленном от эпицентра на расстояние 203 км, условная энергетическая характеристика составила  $K' = 5,7$ . Следовательно, естественно было ожидать вариаций содержания гелия, обусловленных данным подземным толчком во всех трех пунктах наблюдений, которые отражены в табл. 3. И действительно, в них при подготовке землетрясения наблюдалось некоторое снижение концентраций гелия, затем – резкое увеличение накануне подземного толчка и, наконец, очередное снижение после землетрясения.

Таблица 2

**Землетрясения Южного Прибайкалья и их условная энергетическая характеристика в пунктах гидрогеохимических наблюдений**

Землетрясения					Пункты гидрогеохимических наблюдений		
Дата землетрясения	Время землетрясения (по Гринвичу)	Координаты эпицентра землетрясения		Энергетический класс землетрясения	Листвянка	Сухая	Сухой Ручей
		Эпицентральное расстояние от водозабора, км / условная энергетическая характеристика землетрясения, $K' \geq 5$					
год, м-ц, день	час, мин	с.ш.	в.д.	$K$	$L/K$		
2014.05.20	21.35	52,61	106,94	10,4	166/4,8	13/7,6	–
2014.05.27	07.46	52,61	106,94	10,1 афт.	165/4,6	13/7,3	–
2014.06.05	03.47	52,95	107,93	10,1	244/4,2	72/5,5	–
2014.06.18	01.07	53,41	107,51	9,7	250/3,7	100/4,7	–
2014.06.27	16.40	52,60	106,75	9,9	153/4,4	23/6,5	–
2014.07.07	22.21	53,23	108,50	фор. 9,8	290/3,6	124/4,6	–
2014.07.07	22.41	53,28	108,48	11,3	292/5,1	124/6,1	–
2014.07.14	13.56	52,13	106,38	9,7	108/4,6	67/5,1	–
2014.07.20	06.36	51,72	104,40	9,6	33/5,8	205/3,8	–
2014.07.24	10.08	53,45	108,52	10,2	305/4,0	138/4,9	–
2014.08.12	08.43	52,72	107,42	9,5	200/3,7	30/5,8	274/3,4
2014.08.21	20.59	52,14	106,36	9,6	106/4,5	68/5,0	182/3,9
2014.09.01	20.10	50,90	103,27	11,4	152/5,9	320/5,2	90/6,6
2014.09.09	14.29	53,06	107,32	9,6	215/3,8	60/5,2	287/3,5
2014.09.14	11.09	52,40	106,63	9,7	135/4,4	35/5,8	210/3,9
2014.10.17	23.13	55,29	113,64	11,9	687/4,8	525/5,1	750/4,7
2014.10.18	03.04	55,28	113,71	11,0 афт.	690/3,9	525/4,2	759/3,8
2014.10.18	06.29	55,30	113,56	9,5 афт.	685/2,4	525/2,7	750/2,3
2014.10.22	06.12	54,32	111,18	11,4	507/4,6	340/5,1	575/4,4
2014.10.22	11.20	55,39	113,81	11,4	705/4,3	525/4,6	777/4,4
2014.10.24	10.43	53,05	108,66	10,8	282/4,7	112/5,7	360/4,4

Примечание: фор. – форшок, афт. – афтершок.

Таблица 3

**Вариации содержания гелия в глубинной воде Байкала, связанные с землетрясением 01 сентября 2014 г.**

Даты	Содержания He, ( $n \cdot 10^{-5}$ мг/л)		
	Сухой Ручей	Листвянка	Сухая
27.08.2014	5,72	6,07	70,6
28.08.2014	5,2	5,72	93,2
29.08.2014	5,2	5,90	72,5
30.08.2014	–	5,72	42,6
31.08.2014	–	5,64	112,6
01.09.2014	8,35	7,82	114,6
02.09.2014	7,65	5,87	40,0

**Выводы**

В течение нескольких суток до землетрясения отмечалось снижение содержания гелия в глубинной воде Байкала, тогда как за день до подземного толчка произошел его резкий всплеск (аналогичные показатели фиксировались при Култукском землетрясении 2008 г.). За месячный промежуток мы располагаем пока одним зарегистрированным землетрясением, которое проявилось одновременно в трех пунктах гид-

рогеохимических наблюдений, тем не менее, предлагаемый метод поиска предвестников землетрясений в Южном Прибайкалье, на наш взгляд, заслуживает внимания, в связи с чем гидрогеохимические наблюдения в Прибайкалье продолжаются.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-00245).*

*Статья поступила 18.11.2014 г.*

**Библиографический список**

1. Барсуков В.Л. [и др.] Вестники беды (о поиске средств геохимического прогноза землетрясений). М.: Наука, 1989. 136 с.
2. Горбушина Л.В. [и др.] К вопросу о механизме образования радиогидрогеологических аномалий в сейсмоактивном районе и их значении при прогнозировании землетрясений // Советская геология. 1972. № 1. С. 153–156.
3. Грацинский В.Г. [и др.] О выделении радиоактивных газов из образцов горных пород под действием ультразвука // Физика Земли. 1967. № 10. С. 91–94.
4. Карус Е.В. [и др.] К вопросу о прогнозировании неглубоких землетрясений. Новые данные по сейсмологии и сейсмогеологии Узбекистана. Отв. ред. В.И. Уломов. Ташкент: Изд-во ФАН УзССР, 1974. С. 292–302.
5. Саломов Н.Г. [и др.] Поиск геохимических предвестников землетрясений на Душанбинском геофизическом полигоне // Прогноз землетрясений. 1982. № 1. С. 219–241.
6. Семенов Р.М., Смекалин О.П. Сильное землетрясение на Байкале 27 августа 2008 г. и его предвестники // Геология и геофизика. 2011. № 4 (52). С. 521–528.
7. Семенов Р.М. [и др.] Способ краткосрочного прогноза землетрясений / Патент на изобретение. RU 2519050 С 2. G01V 9/00 2006.01.
8. Соболев Г.А. Прогноз землетрясений // Природные опасности России. Сейсмические опасности. 2000. С. 97–138.
9. Хитаров Н.И. [и др.] О геохимических эффектах, сопутствующих тектоническим землетрясениям. Новые данные по сейсмологии и сейсмогеологии Узбекистана. Отв. ред. В.И. Уломов. Ташкент: Изд-во ФАН УзССР, 1974. С. 303–330.
10. Scholz C.H. Earthquake prediction: a physical basis // Science. 1973. Vol. 181. Pp. 803–810.