

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЙ ПРЕДВЕСТНИК ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЮЖНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ

Р.М. Семенов^{1,2}, В.В. Кашковский², М.Н. Лопатин³

¹Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

²Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия

³ФГУП «Урангеологоразведка» БФ «Сосновгеология», 664039, Иркутск, ул. Гоголя, 53, Россия

Приведены результаты по изучению вариаций концентраций растворенного гелия в подземных водах Южного Прибайкалья, обусловленные сейсмическим процессом. В отличие от ранее проведенных подобных исследований, рассмотрены данные, полученные не только в глубинной воде Байкала, но и в артезианских скважинах Южного Прибайкалья. При этом рассчитывались коэффициенты корреляции концентраций между полученными данными в этих пунктах наблюдений, а также индикаторные функции и интегрированная индикаторная функция, которые позволяют объективно оценивать изменения концентраций во времени, предположительно обусловленные изменениями напряженно-деформированного состояния земной коры и, как следствие этого, подготовкой очагов землетрясений, и тем самым прогнозировать время возникновения землетрясений.

Подземные воды, концентрации растворенного гелия, коэффициенты корреляции, интегрированные индикаторные функции, очаг землетрясения, предвестник землетрясений, Южное Прибайкалье.

HYDROGEOCHEMICAL EARTHQUAKE PRECURSOR IN THE SOUTHERN BAIKAL REGION

R.M. Semenov, V.V. Kashkovskii, and M.N. Lopatin

This paper presents the results of study of seismically induced variations in helium concentration in groundwater in the southern Baikal region. Unlike previous studies, data were obtained not only in Baikal deep-water but also in artesian wells in the southern Baikal region. The correlation coefficients between the data obtained at these observation stations, indicator functions, and an integrated indicator functions were calculated. They provide an objective assessment of time variations in concentrations due to changes in the stress-strain state of the Earth's crust related to earthquake preparation and hence permit one to predict the time of an earthquake.

Groundwater, concentration of dissolved helium, correlation coefficients, integrated indicator functions, earthquake focus, earthquake precursor, southern Baikal region

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что накануне сильных землетрясений в областях их подготовки в связи с модификацией напряженно-деформированного состояния земной коры происходят изменения вариаций геофизических полей, в том числе химического состава подземных вод [Rikitake, 1975; Киссин, 1982; Wyss, Habermann, 1987; Kassin, Grinevsky, 1990; Соболев, 1993; Вартанян, 2000]. Одной из первых работ по изучению изменений гидрогеохимического состава, связанных с сейсмичностью, были исследования, проводимые в Узбекистане накануне Ташкентского землетрясения 1966 г. [Уломов, Мавашев, 1967; Уломов, 1971]. Вслед за этим гидрогеохимические исследования с целью прогноза времени возникновения землетрясений проводились во многих сейсмоактивных регионах Земли. Не стало исключением и Прибайкалье, территория которого характеризуется довольно высокой сейсмической активностью.

В 2004 г. в Южном Прибайкалье мы начали изучать концентрации растворенного гелия в глубинной воде оз. Байкал и их вариации, обусловленные изменением сейсмического режима. К тому времени уже было известно, что незадолго до землетрясений в близповерхностных флюидах земной коры на оз. Байкал отмечаются вариации их химического состава [Прасолов, 1990]. Целью наших работ были поиски гидрогеохимических предвестников землетрясений в Южном Прибайкалье. На основании пятилетних исследований удалось установить, что накануне землетрясений происходят заметные своеобразные вариации содержания растворенного гелия. Особенно информативные данные в этом отношении были получены накануне сильного ($M = 6.3$) Култукского землетрясения, произошедшего в южной части Байкала 27 августа 2008 г. [Semenov, 2010; Семенов, Смекалин, 2011]. Тогда в течение трех недель до землетрясения происходили следующие изменения концентраций гелия. Сначала его количество заметно увеличилось относительно его средних значений, затем постепенно уменьшалось до тех пор, пока

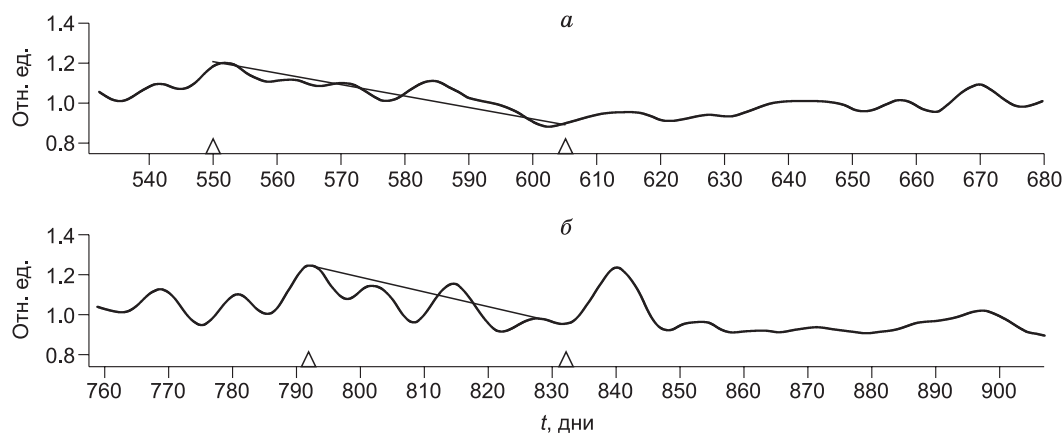


Рис. 1. График изменения нормированных показаний содержания гелия в глубинной воде Байкала:

a — в период с 15.06.2008 г. по 10.11.2008 г.; *б* — в период с 21.01.2009 г. по 25.06.2009 г. Тонкая линия – тренд падения содержания гелия. Здесь и далее: параметр t — количество дней с начала наблюдений (1.01.2007 г.) за содержанием гелия. Описание см. в тексте.

за два дня до сейсмического события концентрация гелия не опустилась ниже двух среднеквадратичных отклонений от фоновых значений, что характерно для краткосрочного предвестника землетрясения [Зубков, 1983, 1987]. Наконец, непосредственно перед толчком во время и после землетрясения они вновь достигли высоких значений концентраций. Спустя несколько часов после основного толчка, 28 августа 2008 г., содержание гелия вновь установилось на уровне фоновых значений. Это отображено на рис. 1, *a*, на котором показано изменение нормированных показаний концентрации гелия в глубинной воде Байкала в период с 15.06.2008 г. по 10.11.2008 г. Треугольниками обозначены даты: 03.07.2008 г. (отметка 550) — начало падения содержаний гелия и 27.08.2008 г. (отметка 605) — Култукское землетрясение 2008 г. с $M = 6.3$. Из рис. 1, *a* следует, что за 45 дней до землетрясения содержание гелия в глубинной воде Байкала сначала поднялось до значения 1.20, а затем снизилось до 0.88, т. е. за период, предшествующий землетрясению, нормированные показания содержания гелия изменились на 0.32 (на 32 %). При этом минимальное содержание гелия в пробах было обнаружено накануне землетрясения.

Таким образом, было сделано предположение, что длительное понижение концентраций гелия, превысившее два среднеквадратичных отклонения от его фоновых значений и, главное, последующее

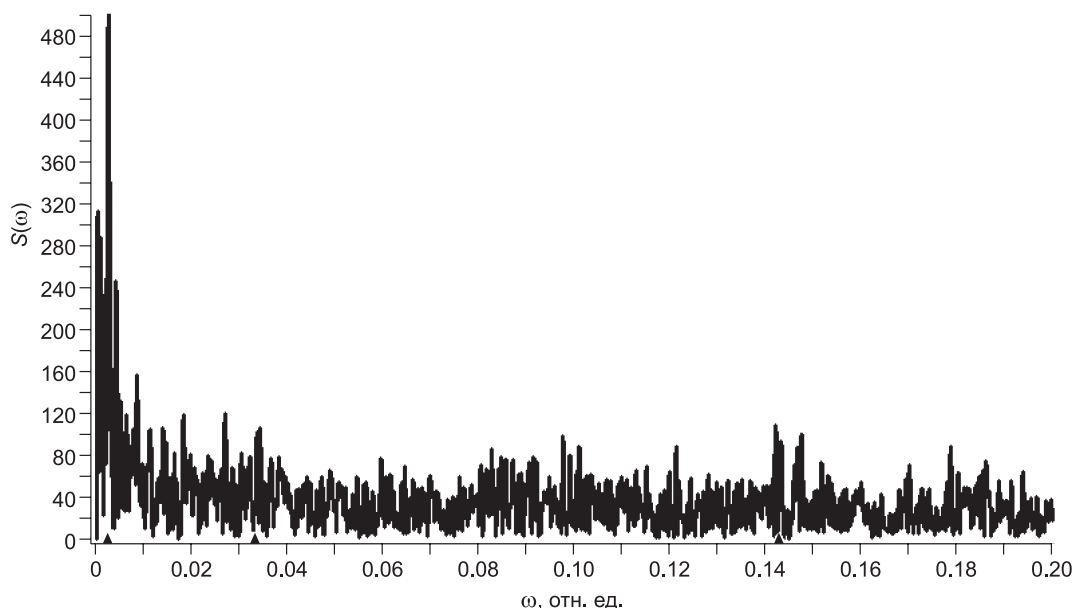


Рис. 2. График изменения содержания гелия за период в 1960 дней.

Треугольниками справа налево обозначены квадраты амплитуд недельного, месячного и годового циклов изменения содержания гелия в глубинной воде Байкала.

его резкое кратковременное повышение накануне землетрясения, можно рассматривать в качестве краткосрочного предвестника землетрясений.

Однако дальнейшие наблюдения показали, что изменение содержания гелия в глубинной воде Байкала на 20—30 % не всегда является предвестником землетрясения. В качестве примера на рис. 1, б показано изменение содержания гелия в глубинной воде Байкала в период с 21.01.2009 г. по 25.06.2009 г. На рисунке треугольниками обозначены даты 02.03.2009 г. (отметка 794) и 11.04.2009 г. (отметка 834). За этот интервал времени показания концентрации гелия изменились с 1.25 до 0.95, т. е. на 0.3 (30 %), однако какой-либо сейсмической активности в этот и последующий периоды не наблюдалось.

Кроме того, возникают трудности в обнаружении точки минимума в содержаниях гелия, которая бы предшествовала сейсмическому событию. Для этого был построен тренд изменения содержания гелия за период, предшествующий Култукскому землетрясению. На рис. 2 показана спектральная характеристика $S(\omega)$ изменения содержания гелия в глубинной воде Байкала, полученная за период наблюдения в размере 1960 дней.

Как следует из рис. 2, изменения содержания гелия в глубинной воде Байкала содержат мультипликативную помеху, которую невозможно отфильтровать частотными фильтрами. Поэтому тренды изменения содержания гелия в глубинной воде Байкала могут быть построены только вручную. Чаще всего это можно сделать лишь задним числом, когда уже есть все результаты наблюдения. Исходя из этого, полученные ранее данные решено было дополнить исследованиями, предлагаемыми в рассматриваемой статье.

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ

В качестве объекта исследований была выбрана концентрация растворенного гелия в подземных водах. Для измерения его содержания в пробах, отбираемых по стандартной методике, использовался прибор ИНГЕМ-1 (индикатор гелия магниторазрядный). Причем концентрации растворенного гелия измеряли в $n \cdot 10^{-5}$ мл/л.

Интенсивность выработки гелия в земной коре зависит только от химического состава пород, а вот на вариации концентраций гелия в подземных водах оказывают влияние многие природные факторы и, в первую очередь, землетрясения. Причем те землетрясения, условная энергетическая характеристика (K') которых в пунктах гидрогеохимических наблюдений превышает 5.0 [Барсуков и др., 1989; 1992]. Именно они способны влиять на изменения гидрогеохимических параметров в подземных водах в областях подготовки и реализации очагов землетрясений. Основной причиной землетрясений, как известно, являются вариации напряженно-деформированного состояния земной коры, вызванные в Южном Прибайкалье процессами рифтогенеза. Для оценки дальности распространения энергии землетрясения используют условную энергетическую характеристику в пунктах наблюдений, которая учитывает энергию землетрясения в очаге и эпицентрального расстояние до пункта наблюдения. Рассчитывается она по формуле:

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

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

Возможно, что именно вариации напряженно-деформированного состояния земной коры перед началом землетрясения и вызывают колебания концентраций гелия в подземных водах. Причем «достоверность выделения предвестников землетрясений существенно возрастает в тех случаях, когда соответствующие сигналы регистрируются на нескольких наблюдательных пунктах» [Киссин, 2009, с. 231]. С этой целью в Южном Прибайкалье, в отличие от ранее проводимых исследований содержания гелия только в глубинной воде Байкала, мы начали изучать концентрации гелия и их вариации в подземных водах, обусловленных сейсмическими процессами, еще на двух самоизливающихся скважинах, которые расположены от Байкала на расстоянии в 30 и 80 км (рис. 3). При анализе полу-

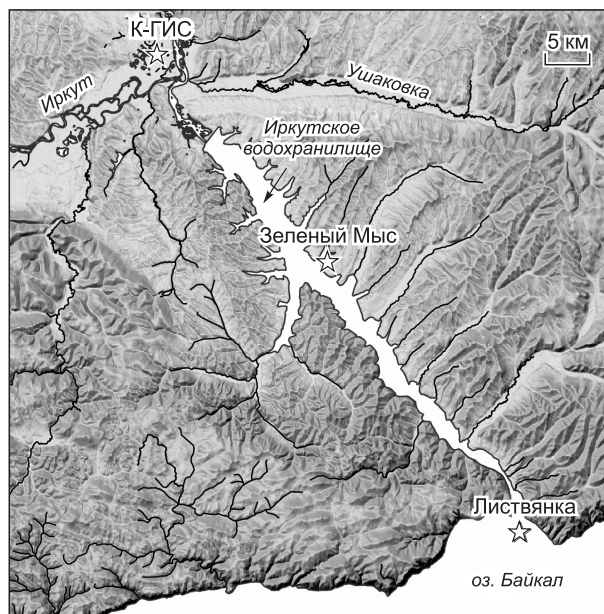


Рис. 3. Расположение пунктов водозабора (отмечены звездочками) в Южном Прибайкалье.

ченных данных использовались не абсолютные значения амплитуд концентраций гелия, а их нормированные значения, позволяющие устранить влияние тензочувствительности при сравнении полученных данных на разных пунктах наблюдений [Киссин, 1988]. Необходимым условием при этом должно быть то, чтобы в расчет принимались лишь те землетрясения, условная энергетическая характеристика которых во всех трех пунктах превышала $K' > 5.0$.

МОДЕЛИ ПОДГОТОВКИ И РЕАЛИЗАЦИИ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В настоящее время известны несколько различных моделей, описывающих подготовку и реализацию очага землетрясения [Соболев, 1993]. Изменения концентраций растворенного гелия в подземных водах накануне подземных толчков, на наш взгляд, хорошо согласуются с дилатантно-диффузионной моделью [Scholz et al., 1973]. На ее основании подготовка и реализация очага землетрясения и связанных с ними изменений концентраций гелия в подземных водах объясняются следующим образом (рис. 4).

На первой стадии развития модели 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 в горных породах приводит к ослаблению адсорбционных сил, удерживающих газ на стенках пор и пустот внутри пород, десорбции эманации и переходу «связанного» газа в свободный [Горбушина и др., 1972; Хитаров и др., 1974]. Кроме того, ультразвуковые колебания, проходя через обводненные горные породы, ускоряют диффузионный процесс выделения газов и обогащают водную фазу газами [Грацинский и др., 1967; Шабынин и др., 1983]. 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, происходит увеличение объема горных пород и в верхней части земной коры образуется зона трещинной дилатансии. Горная порода при этом относительно осушается, внутрипоровое давление падает и прочность породы повышается [Соболев, 2000].

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 гелия в подземных водах.

При дальнейшем повышении напряжения мелкие трещины группируются в магистральный разрыв, с которым связано возникновение землетрясения, происходит резкое выделение растворенного гелия из пор и трещин, повышается его содержание в подземных водах.

После землетрясения происходит уплотнение пород, закрытие трещин и, следовательно, восстанавливается прежний режим выхода гелия, вследствие чего его содержания приходят к своим фоновым значениям [Карус и др., 1974].

Следует также учитывать, что земная кора в районе эпицентра будущего землетрясения имеет сложную трехмерную геометрическую форму и неоднородна по своей иерархической структуре. Поэтому изменение напряжения земной коры перед разрывом происходит не равномерно, а несколькими последовательными импульсами. Все это приводит к тому, что перед землетрясением концентрация содержания гелия в подземных водах в функции от времени t носит случайный переменный характер. В качестве примера на рис. 5 показаны нормированные показания концентрации гелия в подземных водах трех пунктов наблюдения перед Култукским землетрясением 27.08.2008 г. (отметка 605) и после

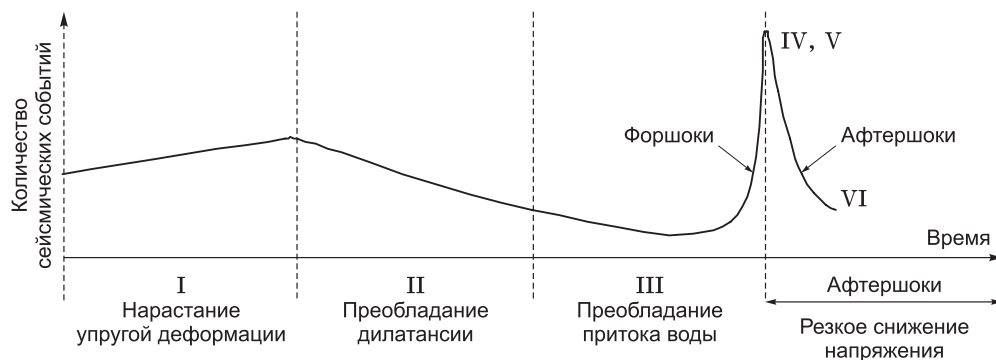


Рис. 4. Дилатантно-диффузионная модель подготовки и реализации очага тектонического землетрясения [Scholz et al., 1973].

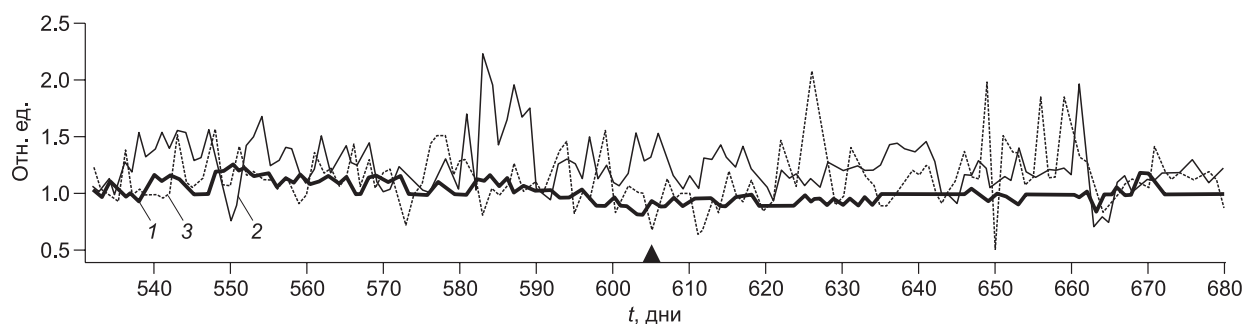


Рис. 5. График изменения нормированных показаний концентрации гелия в подземных водах (даные с 15.06.2008 г. по 10.11.2008 г.) перед Култукским землетрясением 27.08.2008 г. (отметка 605).

Пункты наблюдения: 1 — Листвянка, 2 — Зеленый Мыс, 3 — К-ГИС (г. Иркутск).

него. Установленные колебания концентрации содержания гелия в подземных водах в функции от времени t существенно затрудняют прогноз времени возникновения землетрясений.

Как показали наблюдения за содержанием гелия в подземных водах, на концентрацию гелия помимо напряженно-деформированного состояния земной коры могут влиять и другие факторы, среди которых выделяются «астрономически точные» — приливные процессы, «менее точные» — сезонные колебания и «весьма случайные» — колебания, связанные с изменением погоды [Барсуков и др., 1989]. Но они, как правило, оказывают краткосрочные изменения в концентрациях гелия, выражающиеся в их единичных отклонениях в сторону повышения или понижения значений содержаний. В связи с этим было предложено удалять одиночные выбросы высокоградиентных вариаций и тем самым приводить последовательности временных отсчетов к равномерной дискретности [Рябинин, Кузьмин, 2012]. Колебания концентраций, связанные с вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры, обычно продолжаются в течение определенного времени. Влияние случайных факторов на вариации гелия исключается путем расчетов индикаторных функций при обработке полученных данных.

ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

В ходе проведенных исследований была выполнена оценка коэффициентов корреляции показателей концентрации гелия $\tilde{r}_{Л-З}$, $\tilde{r}_{Л-К}$ и $\tilde{r}_{З-К}$ (Л — Листвянка, З — Зеленый Мыс, К — К-ГИС). Результаты вычисления параметров распределения измерений концентрации гелия в пунктах наблюдения приведены в таблице.

По результатам наблюдения измерений концентрации гелия были получены следующие оценки коэффициентов корреляции:

$$\tilde{r}_{Л-З} = 0.0046; \quad \tilde{r}_{Л-К} = 0.1438; \quad \tilde{r}_{З-К} = 0.1699.$$

Такие значения коэффициента корреляции в математической статистике принято называть слабыми. Кстати, подобные значения отмечались и ранее в других сейсмоактивных регионах, в которых измерения проводились одновременно в нескольких пунктах наблюдений [Саломов и др., 1982; Киссин, 2009]. Слабые коэффициенты корреляции концентраций гелия в точках наблюдения обусловлены, вероятно, тем, что точки наблюдения отстоят друг от друга на расстоянии около 60 км. В связи с этим отклик изменений гелия по времени в точках наблюдения на зарождение очага землетрясения несколько разнится. Поэтому, по нашему мнению, основной причиной изменений концентраций гелия в подзем-

Параметры распределения измерений концентрации гелия в пунктах наблюдения, полученные за период с 01.01.2007 г. по 31.08.2013 г.

№ п/п	Место измерения гелия	Число измерений гелия	Среднее значение концентраций гелия ($\bar{m}$)	СКО концентраций гелия ($\bar{\sigma}$)	Нормированные СКО концентраций гелия ($\frac{\bar{\sigma}}{\bar{m}}$)
1	Листвянка	2163	5.8394	0.5655	0.0970
2	Зеленый Мыс	2228	1938.13	419.93	0.2167
3	К-ГИС	1817	55.4447	11.8185	0.2132

ных водах Южного Прибайкалья все же являются вариации напряженно-деформированного состояния земной коры. В отличие от случайного влияния «менее точных» и «весьма случайных» факторов, изменение напряженно-деформированного состояния земной коры вызывает неслучайное изменение показаний концентрации гелия во всех пунктах измерения.

Чтобы отделить неслучайное отклонение показаний концентрации гелия от его случайных изменений, предлагается применить парные индикаторные функции $I_{Л-З}(\Delta t_i)$, $I_{Л-К}(\Delta t_i)$, $I_{З-К}(\Delta t_i)$ между пунктами измерения Листвянка — Зеленый Мыс, Листвянка — К-ГИС и Зеленый Мыс — К-ГИС соответственно:

$$I_{Л-З}(\Delta t_i) = \frac{1}{10\tilde{\sigma}_{H_{Л}}\tilde{\sigma}_{H_{З}}} \sum_{j=-5}^5 (H_{Л_{i-j}} - \tilde{m}_{H_{Л}})(H_{З_{i-j}} - \tilde{m}_{H_{З}}),$$

$$I_{Л-К}(\Delta t_i) = \frac{1}{10\tilde{\sigma}_{H_{З}}\tilde{\sigma}_{H_{К}}} \sum_{j=-5}^5 (H_{Л_{i-j}} - \tilde{m}_{H_{Л}})(H_{К_{i-j}} - \tilde{m}_{H_{К}}),$$

$$I_{З-К}(\Delta t_i) = \frac{1}{10\tilde{\sigma}_{H_{З}}\tilde{\sigma}_{H_{К}}} \sum_{j=-5}^5 (H_{З_{i-j}} - \tilde{m}_{H_{З}})(H_{К_{i-j}} - \tilde{m}_{H_{К}}),$$

где $H_{Л_{i-j}}$, $H_{З_{i-j}}$, $H_{К_{i-j}}$ — ежедневные измерения гелия в пунктах Листвянка, Зеленый Мыс, К-ГИС соответственно.

Парные индикаторные функции представляют собой разновидность цифрового фильтра [Цифровые фильтры..., 1983] с шириной «окна» в 11 измерений (11 дней). Фазовая задержка при этом составляет всего 5 дней, что вполне допустимо для среднесрочного прогноза. Ширина окна была подобрана опытным путем.

Парные индикаторные функции дополняет интегрированная индикаторная функция:

$$I(\Delta t_i) = \frac{1}{10} \sum_{j=-5}^5 \prod_{k=1}^{N_{СК}} \left| \frac{H_{k_{i-j}} - \tilde{m}_k}{\tilde{\sigma}_k} \right|,$$

где $N_{СК}$ — количество пунктов измерения концентрации гелия в подземных водах.

В рассматриваемом случае $N_{СК}=3$, в общем случае $N_{СК}$ может быть любым числом, большим 2.

По различным организационным причинам некоторые измерения концентрации гелия могут быть пропущены. В случае отсутствия парных измерений парные индикаторные функции $I_{Л-З}(\Delta t_i)$, $I_{Л-К}(\Delta t_i)$ и $I_{З-К}(\Delta t_i)$ принимают значение ноль.

Для отсутствующих измерений $H_{k_{i-j}}$ сомножитель

$$\frac{H_{k_{i-j}} - \tilde{m}_k}{\tilde{\sigma}_k}$$

в интегрированной индикаторной функции $I(\Delta t_i)$ принимает значение единицы.

По сути, индикаторные функции это текущие значения коэффициента корреляции, отличающиеся тем, что $\tilde{m}$ и $\tilde{\sigma}$ вычислены для них по всей выборке измерений, а не для окна. Индикаторные функции показывают взаимосвязь между точками измерения концентрации гелия, они не зависят от погодных, сезонных и других случайных факторов, действующих на каждую точку измерения концентрации гелия независимо друг от друга. Физический смысл индикаторных функций $I_{Л-З}(\Delta t_i)$, $I_{Л-К}(\Delta t_i)$, $I_{З-К}(\Delta t_i)$ и $I(\Delta t_i)$ заключается в том, что количественно они обратно пропорциональны интенсивности сейсмотектонических процессов на территории, охваченной наблюдениями. Три пункта измерения концентрации гелия в подземных водах в Южном Прибайкалье образуют единую измерительную систему, своеобразный «манометр» с базой измерения примерно в 80 км длиной.

С точки зрения анализа сейсмической обстановки в Южном Прибайкалье, пожалуй, наибольший теоретический и практический интерес представляет парная индикаторная функция $I_{Л-З}(\Delta t_i)$ (рис. 6, а). Наблюдения за этой функцией в период с 24.01.2008 г. (отметка 389) по 20.06.2008 г. (отметка 537) позволили выделить несколько периодов, когда отрицательные значения этой функции представлены в виде четко выраженных треугольных импульсов со средней продолжительностью примерно 20—30 сут. В целом эти импульсы отражают колебания концентраций гелия, вероятно, связанные с вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры (повышения давления и дилатансии, см. рис. 4). Однако признаками сильных землетрясений они не являются. Их отличительной чертой можно считать малое значение интегрированной индикаторной функции $I(\Delta t_i)$, которое в редких случаях достигает значения 1.0 (см. рис. 6, а).

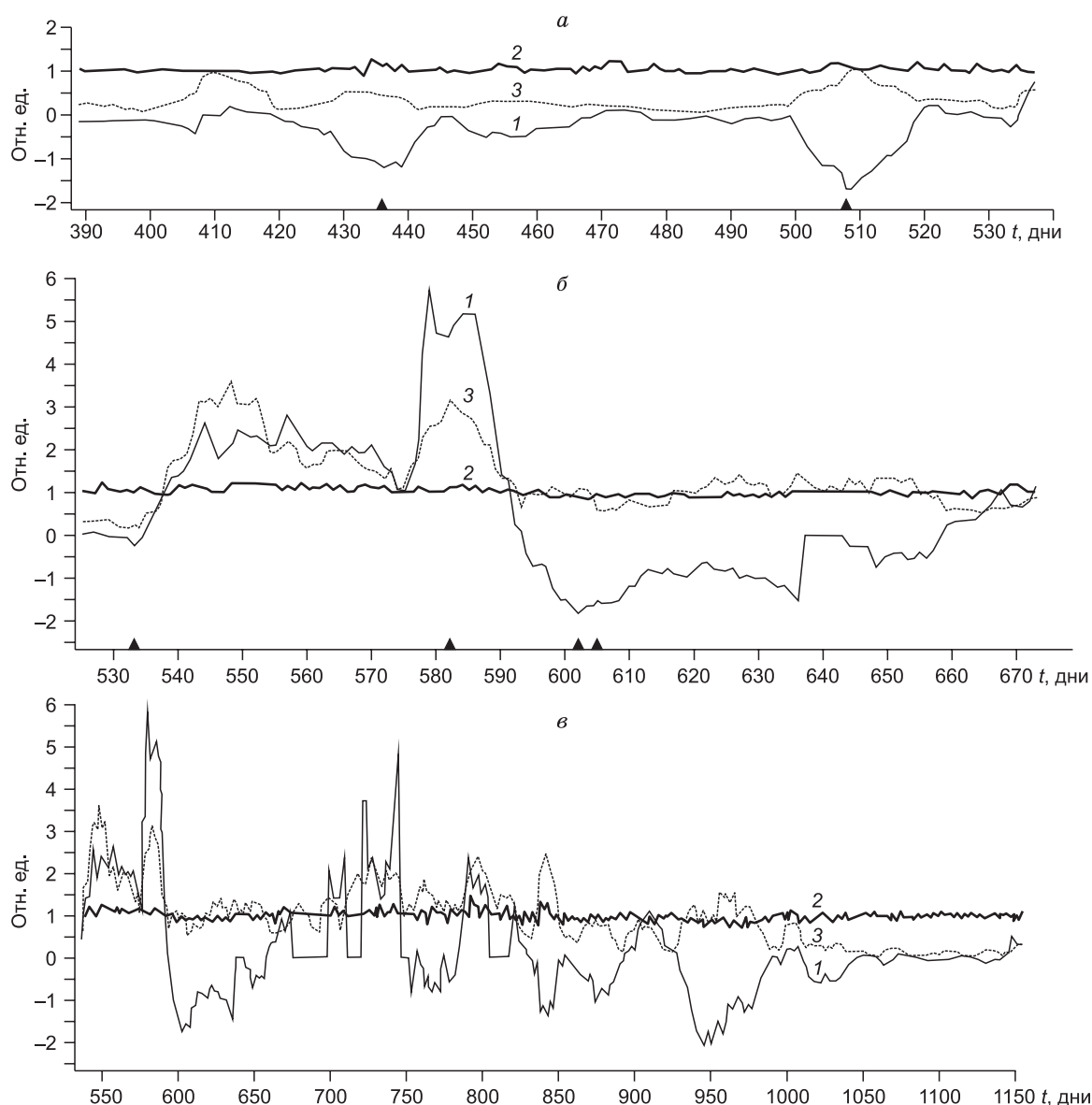


Рис. 6. Кривые изменений функций (а — с 24.01.2008 г. по 20.06.2008 г., б — с 08.06.2008 г. по 03.11.2008 г., в — с 19.06.2008 г. по 27.02.2010 г.):

I — парной индикаторной функции $I_{Л-3}(\Delta t_i)$; 2 — нормированных значений содержаний гелия в глубинной воде Байкала; 3 — интегрированной индикаторной функции $I(\Delta t_i)$. а — треугольниками показаны отрицательные значения парной индикаторной функции.

Результаты наблюдения показывают, что среднесрочным признаком сильных землетрясений в зоне наблюдения за концентрацией гелия в подземных водах являются большие (более 2.5) показания интегрированной индикаторной функции $I(\Delta t_i)$ на протяжении не менее месяца. В качестве примера на рис. 6, а, б показаны предвестники Култукского землетрясения с энергетическим классом 15.9, произошедшего 27.08.2008 г. (отметка 605). Эпицентр землетрясения находился на расстоянии 64 км от водозабора Листвянка, 66 км от Зеленого Мыса и 80 км от пункта наблюдения К-ГИС.

С начала наблюдения (24.01.2008 г., отметка 389) и до 16.06.2008 г. (отметка 533) (см. рис. 6, а) в Южном Прибайкалье была спокойная сейсмическая обстановка. Об этом, можно судить по формам кривых парной индикаторной функции $I_{Л-3}(\Delta t_i)$ и интегрированной индикаторной функции $I(\Delta t_i)$. С 16.06.2008 г. (отметка 533), согласно дилатантно-диффузионной модели, образовалась зона трещинной дилатансии, величина интегрированной индикаторной функции $I(\Delta t_i)$ стала нарастать и 01.07.2008 г. (отметка 548), за 57 дней до Култукского землетрясения, достигла абсолютного максимума ($I(\Delta t_i) = 3.5884$) (см. рис. 6, б).

После этого напряжения в земной коре и в очаге будущего землетрясения, вероятно, стали нарастать и 27.07.2008 г. (отметка 574) достигли локального максимума, а интегрированная индикаторная функция — минимума ($I(\Delta t_i) = 1.0221$).

Можно предположить, что после этого напряжения в земной коре продолжали возрастать и достигли предела прочности горных пород на еще одном участке очага будущего землетрясения, что привело к повторному возрастанию интегрированной индикаторной функции $I(\Delta t_i)$ и 04.08.2008 г. (отметка 582) она достигла значения 3.1179 (см. рис. 6, б).

Синхронно с интегрированной индикаторной функцией $I(\Delta t_i)$ изменялась парная индикаторная функция $I_{Л-3}(\Delta t_i)$, которая 01.08.2008 г. (отметка 579) достигла своего абсолютного максимума 5.6143 за весь период наблюдений. Эти данные можно принимать за предвестник близкого по времени разрыва горных пород в очаге будущего землетрясения.

В точке 602, которую можно рассматривать как самый мощный импульс растяжения за весь период наблюдений, индикаторная функция $I_{Л-3}(\Delta t_i)$ составила -1.8616 , а нормированное показание гелия в этой точке $H_{Л_{602}} / \tilde{m}_{Н_{Л}}$ составило 0.89051.

За день до землетрясения краткосрочный признак $H_{Л_{604}} / \tilde{m}_{Н_{Л}}$ достиг своего минимума, равного 0.82029, начиная с 01.07.2008 г.

27.08.2008 г. (отметка 605, см. рис. 6, б) произошел разрыв горных пород в южной части Байкала, сопровождающийся землетрясением с энергетическим классом 15.9.

Как показал анализ наблюдения за выделением гелия перед Култукским землетрясением, максимум интегрированной индикаторной функции в точке измерения 548 $I(\Delta t_i)$ составил 3.6450 и был бы получен за 52 дня до землетрясения, что, вероятно, и можно рассматривать в качестве среднесрочного прогноза сильного землетрясения.

После землетрясения 27.08.2008 г. (отметка 605) и вплоть до 14.11.2009 (отметка 1049) в очаговой зоне землетрясения происходила релаксация напряженно-деформированного состояния земной коры, сопровождающаяся афтершоками. Это наглядно просматривается на рис. 6, в по широким колебаниям парной индикаторной функции $I_{Л-3}(\Delta t_i)$ и сейсмической активности в южной части Байкала в виде серии афтершоков с энергетическими классами от 9.5 до 10.5. При этом интегрированная индикаторная функция $I(\Delta t_i)$ все это время не превышала значения 2.5, что свидетельствовало об отсутствии зарождения новых очагов сильных землетрясений в южной части Байкала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение растворенного гелия в глубинной воде оз. Байкал и в подземных водах Южного Прибайкалья показало, что его концентрации испытывают постоянные вариации. Обусловлены они как случайными факторами (приливные процессы в земной коре, сезонные и погодные колебания), так и изменениями напряженно-деформированного состояния земной коры в связи с подготовкой землетрясений. Исследование вариаций концентраций гелия накануне подземных толчков позволило выявить среднесрочные предвестники землетрясений в Южном Прибайкалье. Для того, чтобы исключить влияние случайных факторов на вариации концентраций гелия, были проведены расчеты коэффициентов корреляции, парных индикаторных и интегрированной индикаторной функций. Полученные результаты позволили установить, что среднесрочным признаком сильного землетрясения явилось высокое значение интегрированной индикаторной функции, которая проявилась за 52 дня до подземного толчка.

Результаты, изложенные в данной статье, в 2015 г. были направлены в Государственный реестр изобретений Российской Федерации и 10.11.2016 г. был получен патент на изобретение [Патент..., 2016].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-05-00245).

ЛИТЕРАТУРА

Барсуков В.Л., Беляев А.А., Серебренников В.С. Вестники беды (о поиске средств геохимического прогноза землетрясений) / Отв. ред. Г.И. Войтов. М., Наука, 1989, 136 с.

Барсуков В.Л., Беляев А.А., Бакалдин Ю.А., Игумнов В.А., Ибрагимова Т.Л., Серебренников В.С., Султанходжаев А.Н. Геохимические методы прогноза землетрясений. М., Наука, 1992, 213 с.

Вартанян Г.С. Флюидосфера, геодинамическая фильтрация и формирование трещинной проницаемости в ходе погружения осадочных толщ // Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений топливно-энергетического сырья. М., Геоинформмарк, 2000, № 6, с. 1—33.

Горбушина Л.В., Тыминский В.Г., Спиридонов А.И. К вопросу о механизме образования радиогидрогеологических аномалий в сейсмоактивном районе и их значение при прогнозировании землетрясений // Советская геология, 1972, № 1, с. 153—156.

Грацинский В.Г., Горбушина Л.В., Тыминский В.Г. О выделении радиоактивных газов из образцов горных пород под действием ультразвука // Физика Земли, 1967, № 10, с. 91—94.

Зубков С.И. О зависимости времени возникновения и радиуса зоны проявления электротеллурического предвестника от энергии землетрясения // Физика Земли, 1983, № 4, с. 101—105.

Зубков С.И. Времена возникновения предвестников землетрясений // Физика Земли, 1987, № 5, с. 87—91.

Карус Е.В., Кузнецов О.Л., Симкин Э.М., Тыминский В.Г., Уломов В.И., Файзуллин И.С. К вопросу о прогнозировании неглубоких землетрясений // Новые данные по сейсмологии и сейсмогеологии Узбекистана. Ташкент, Изд-во «ФАН» УзССР, 1974, с. 292—302.

Киссин И.Г. Землетрясения и подземные воды. М., Наука, 1982, 176 с.

Киссин И.Г. Высокоамплитудные предвестники землетрясений и «чувствительные зоны» земной коры // Физика Земли, 1988, № 6, с. 3—13.

Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М., Наука, 2009, 328 с.

Патент RU № 2 601 403 C2. Способ гидрогеохимического определения времени возникновения землетрясений в Южном Прибайкалье / Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. 2016, Бюл. № 31, 29 с.

Прасолов Э.М. Изотопная геохимия и происхождение природных газов. Л., Недра, 1990, 283 с.

Рябинин Г.В., Кузьмин Ю.Д. Гидрогеохимический мониторинг сейсмотектонических процессов на Камчатке. Современное состояние, результаты, перспективы развития // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. Петропавловск-Камчатский, ХК «Новая книга», 2012, с. 211—235.

Саломов Н.Г., Мирзоев К.М., Попова Г.Д. Поиск геохимических предвестников землетрясений на Душанбинском геофизическом полигоне // Прогноз землетрясений. № 1. Душанбе, Изд-во «Дониш», 1982, с. 219—241.

Семенов Р.М., Смекалин О.П. Сильное землетрясение на Байкале 27 августа 2008 г. и его предвестники // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (4), с. 521—528.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 313 с.

Соболев Г.А. Прогноз землетрясений // Сейсмические опасности. Природные опасности России. М., Издательская фирма «Крук», 2000, с. 97—138.

Уломов В.И. Внимание! Землетрясение! Ташкент, Изд-во «Узбекистан», 1971, 160 с.

Уломов В.И., Мавашев Б.З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения // Докл. АН СССР, 1967, т. 176, № 2, с. 319—321.

Хитаров Н.И., Войтов Г.И., Лебедев В.С., Султанходжаев А.Н., Уломов В.И., Тыминский В.Г., Горбушина Л.В., Спиридонов А.И., Гнипп Л.В., Осика Д.Г., Каспаров С.А. О геохимических эффектах, сопутствующих тектоническим землетрясениям // Новые данные по сейсмологии и сейсмогеологии Узбекистана. Ташкент, Изд-во «ФАН» УзССР, 1974, с. 303—330.

Цифровые фильтры и их применение / В. Капелини, А.Дж. Константи́нидис, П. Эмилиани. М., Энергоатомиздат, 1983, 360 с.

Шабынин Л.Л., Найдич В.И., Новиков В.М. О механизме формирования гидрогеохимических предвестников землетрясений // Гидрогеохимические исследования на прогностических полигонах: тезисы докладов Всесоюзного совещания. Алма-Ата, Наука, 1983, с. 99—101.

Kissin J.G., Grinevsky A.O. Main features of hydrogeodynamic earthquake precursors // Tectonophysics, 1990, v. 178, № 2—4, p. 277—286.

Rikitake T. Earthquake precursors // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1975, v. 65, № 5, p. 1133—1162.

Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis // Science, 1973, v. 181, p. 803—810.

Semenov R.M. Earthquake of 27 August 2008 in the Southern Baikal area its precursors // Geodynam. Tectonophys., 2010, v. 1, № 4, p. 441—447.

Wyss M., Habermann R.E. Precursory seismic quiescence // Physical and observational basis for intermediate-term earthquake prediction: Open-file report 87-591. Menlo-Park, CA, 1987, v. 2, p. 526—536.