

**В.В. Кашковский<sup>1</sup>, Р.М. Семенов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация.

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация.

## **ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННЫХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ**

**Аннотация.** *Статья является продолжением научных работ в сейсмологии, основанных на системном подходе к проблеме выявления предвестников сейсмической активности и достоверного прогноза землетрясений. Несмотря на то, что в настоящее время известно большое количество их предвестников, землетрясения продолжают происходить неожиданно не только для населения, но и для специалистов – сейсмологов. В 2012-2018 годах авторами была предложена энергетическая модель подготовки и реализации очага землетрясения, объясняющая возникновение предвестников землетрясения различной физической природы. На основании этой модели был разработан метод среднесрочного прогноза времени возникновения землетрясения, основанный на проявлении корреляционной зависимости концентрации гелия в подземных водах перед землетрясением. Данный метод был запатентован (Патент на изобретение RU № 2601403С2). Последующие исследования в данном направлении показали, что частные методики, разработанные в рамках этого метода, оказались применимы не только в сейсмологии, но и для исследования глубинной геодинамики. В статье рассмотрены причины возникновения мантийных плюмов и их влияние на строение континентов. Предложен метод количественного исследования динамики взаимодействия мантийного плюма с литосферой на основе изменения концентрации растворённых радона и гелия в подземных водах. Приведены практические результаты исследования динамики взаимодействия Байкальского мантийного плюма с литосферой. Высказаны предположения о необходимости изучения влияния динамики взаимодействия Байкальского мантийного плюма с литосферой на масштабные сооружения железной дороги: мосты, насыпи, эстакады и т.п.*

**Ключевые слова:** *системный подход, глубинная геодинамика, мантийные плюмы, концентрация растворенного радона и гелия в подземных водах, обработка статистических данных, спектральный анализ*

**V.V. Kashkovsky<sup>1</sup>, R.M. Semenov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Irkutsk state University of railway engineering, Russian Federation.

<sup>2</sup> Institute of earth crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation.

## **APPLICATION OF SPECTRAL ANALYSIS THE CONCENTRATION OF DISSOLVED INERT GASES IN GROUNDWATER FOR THE STUDY OF DEEP-SEATED GEODYNAMICS**

**Annotation.** *The article is a continuation of scientific work in seismology, based on a systematic approach to the problem of identifying precursors of seismic activity and reliable prediction of earthquakes. Despite the fact that a large number of their precursors are currently known, earthquakes continue to occur unexpectedly not only for the population, but also for seismologists. In 2012-2018, the authors proposed an energy model for the preparation and implementation of the earthquake source, which explains the occurrence of earthquake precursors of different physical nature. On the basis of this model, a method of medium-term prediction of the time of occurrence of the earthquake was developed, based on the manifestation of the correlation*

dependence of helium concentration in groundwater before the earthquake. This method was patented (patent for the invention RU № 2601403C2). Subsequent studies in this direction have shown that the particular methods developed in the framework of this method were applicable not only in seismology, but also for the study of deep geodynamics. The article deals with the causes of mantle plumes and their influence on the structure of continents. A method of quantitative study of the dynamics of the interaction of the mantle plume with the lithosphere on the basis of changes in the concentration of dissolved radon and helium in groundwater is proposed. The practical results of the study of the dynamics of the interaction of the Baikal mantle plume with the lithosphere are presented. It is suggested that it is necessary to study the influence of the dynamics of the interaction of the Baikal mantle plume with the lithosphere on large-scale railway structures: bridges, embankments, overpasses, etc.

**Keywords:** system approach, deep geodynamics, mantle plumes, concentration of dissolved radon and helium in groundwater, statistical data processing, spectral analysis

**Введение.** В начале 70-х годов XX столетия Джейсон Морган предложил гипотезу мантийных плюмов [1], позволяющую объяснить существование вулканов в таких горячих точках как, например, Гавайи (рис. 1).

Согласно современным воззрениям [2] Земля имеет в первом приближении форму шара у которого экваториальный диаметр составляет 12 754 км, а полярный — около 12 711 км. Земля состоит из нескольких оболочек, выделенных по химическим или реологическим свойствам (реология — раздел физики, изучающий деформации и текучесть вещества.). В центре Земли расположено внутреннее ядро с радиусом около 1250 км, которое в основном состоит из железа и никеля. Далее идёт внешнее ядро (состоящее в основном из железа) с толщиной около 2200 км. Над ним лежат 2900 км вязкой мантии, состоящей из силикатов и оксидов, а ещё выше — довольно тонкая твёрдая кора (литосфера). Она тоже состоит из силикатов и оксидов, но обогащена элементами, которые не встречаются в мантийных породах.

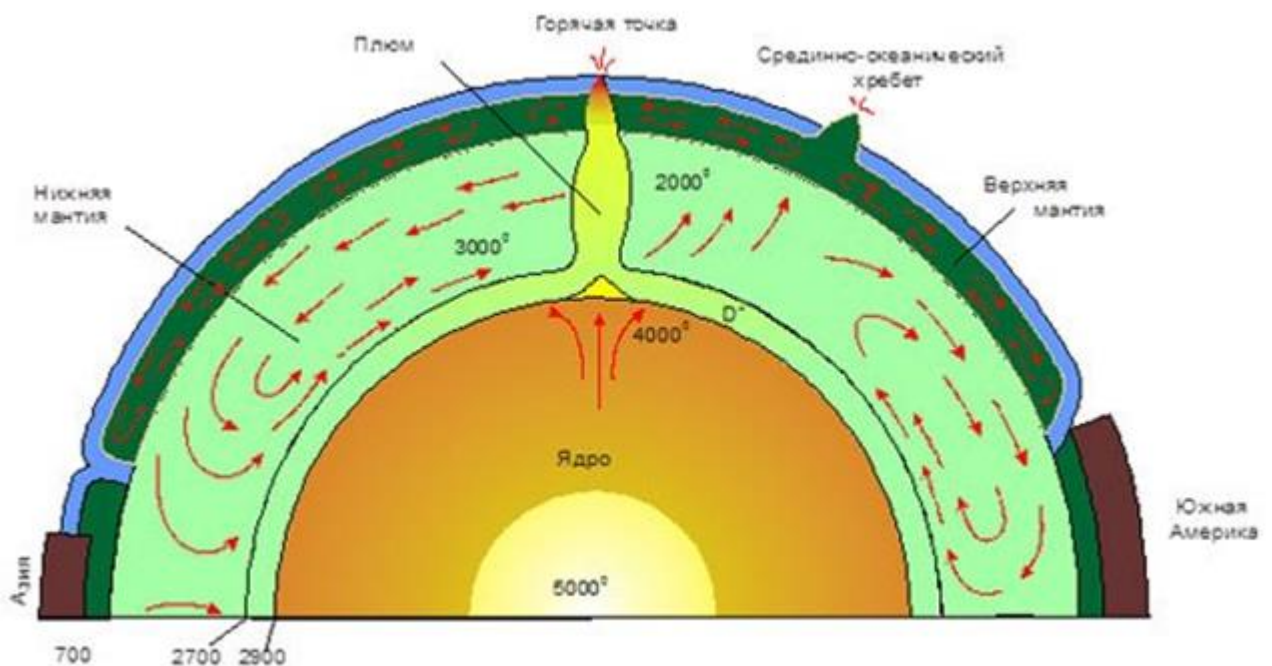


Рис. 1. Возникновение горячей точки, вызванной мантийным плюмом.

Температура внутреннего ядра Земли - 5000°C, внешнего ядра - 4000°C, температура нижней мантии в зависимости от глубины колеблется от 3000°C до 2000°C. Максимальная

температура, зафиксированная на поверхности Земли, составляет  $+56,7^{\circ}\text{C}$  (10 июля 1913 года, ранчо Фёрнис-Крик, Долина Смерти, Калифорния, США), минимальная, соответственно,  $-89,2^{\circ}\text{C}$  (Станция Восток, Антарктида, 21 июля 1983 года). Таким образом, между ядром Земли и её поверхностью существует перепад температур, составляющий примерно  $5000^{\circ}\text{C}$ . Такой перепад температур неизбежно должен приводить к возникновению вертикальных потоков вещества (рис. 2), называемого мантийным плюмом.

При движении тектонической (литосферной) плиты над мантийным плюмом возникает цепочка вулканов, которая формирует поверхность Земли. В качестве примера на рис. 3 показано движение мантийного плюма и следы изверженных провинций на пути его следования. Так, например, был образован Гавайский архипелаг, состоящий из 24 островов и атоллов. Самый старый из надводных островов — Мидуэй, ему 28,3 млн лет [3]. Цепочка островов архипелага сформирована в результате вулканической деятельности и движения тихоокеанской литосферной плиты на северо-запад над магматической Гавайской горячей точкой со скоростью порядка 52 километра за 1 млн. лет.

В результате мощных многолетних извержений мантийных плюмов образуются траппы - горные породы вулканического происхождения, занимающие значительные площади, так называемые трапповые области. Такие области богаты залежами полезных ископаемых, включая редкие металлы, редкоземельные элементы, золото, алмазы и т.п. Примером являются Сибирские траппы — одна из самых крупных трапповых провинций мира. Она расположена на Восточно-Сибирской платформе. Сибирские траппы изливались на границе палеозоя и мезозоя, а именно пермского и триасового периодов, около 252 млн лет назад [4].

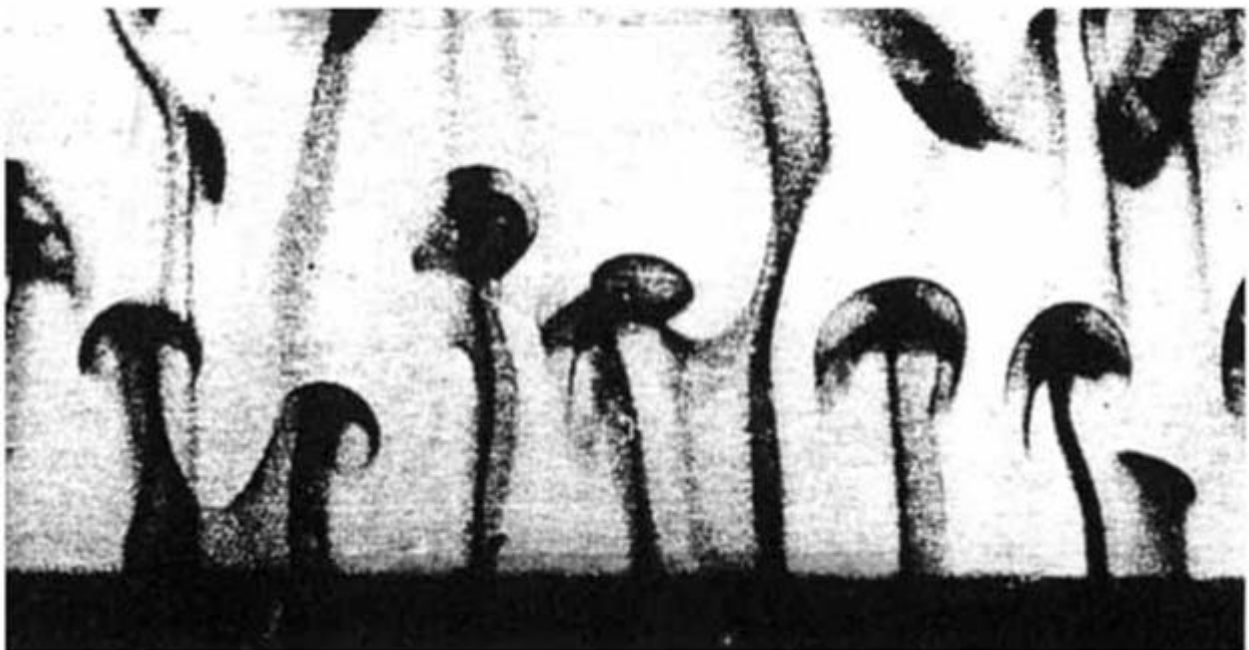


Рис. 2. Термальные плюмы, растущие из нестабильного температурного пограничного слоя в воде, подогреваемой снизу. Пограничный слой окрашен электрохимическим способом [1].

Сибирские траппы развиты на площади около 2 миллионов  $\text{km}^2$ . Объём извергнутых расплавов составил по разным оценкам 1—4 млн  $\text{km}^3$  эффузивных и интрузивных пород, или более 5 млн  $\text{km}^3$ . Одновременно с ними произошло крупнейшее (пермо-триасовое) вымирание видов в истории Земли [4].

Мантийные плюмы не только формируют поверхность Земли, но и являются той «машиной», которая движет континентами. По поверхностным проявлениям внутриплитового магматизма за последние 15 млн лет были выявлены 47 так называемых горячих точек. Они группируются в четыре весьма обширные (до 10 тыс. км в поперечнике), но компактные зоны, названные «горячими полями мантии Земли»: Африканскую,

Тихоокеанскую, Центрально-Азиатскую и Тасманскую. Эти области, соответствующие частично расплавленному веществу мантии, часто называют также суперплюмами. Их связь с современными проявлениями вулканизма подтверждается также локализацией на поверхности планеты всех известных на сегодня 49 горячих точек, определенных методом сейсмотомографии [1, 5]. Именно суперплюмы ответственны за возникновение и распад суперконтинентов [6]. По современным представлениям [7] земная кора постоянно переконфигурируется в ходе суперконтинентальных циклов: её блоки движутся относительно друг друга, что приводит к перемещению, столкновению и распаду континентов. Один суперконтинентальный цикл продолжается от 300 до 500 миллионов лет.

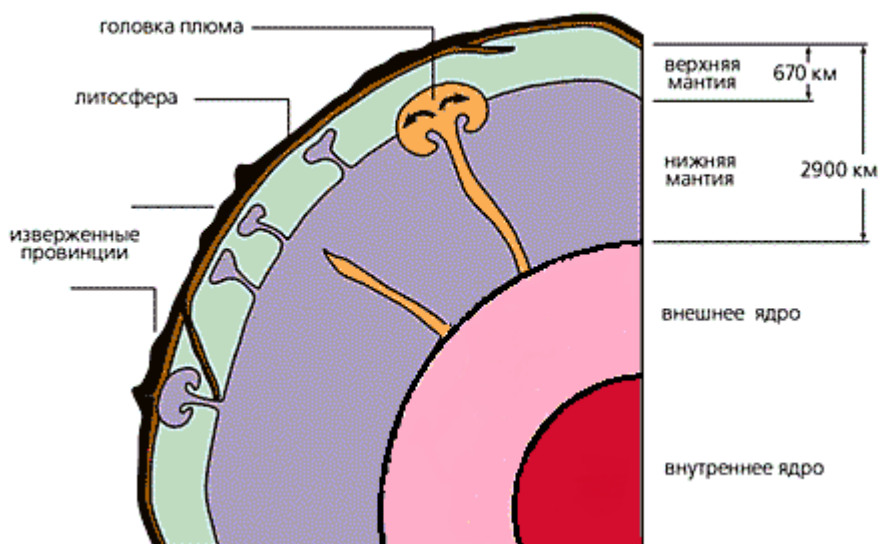


Рис. 3. Движение тектонической плиты над мантийным плюмом.

В настоящее время насчитывается восемь таких циклов, приводящих к возникновению и распаду суперконтинентов:

1. Ваальбара (примерно 3,6 миллиарда лет назад);
2. Ур (примерно 3 миллиарда лет назад);
3. Кенорланд (примерно 2,7 миллиарда лет назад);
4. Колумбия, также известен как Нуна, (~1,8—1,5 миллиарда лет назад);
5. Родиния (~1,1 миллиард лет назад — ~750 миллионов лет назад);
6. Паннотия (примерно 600—540 миллионов лет назад);
7. Лавруссия (около 300 миллионов лет назад);
8. Пангея (примерно 300—180 миллионов лет назад).

Исходя из сказанного очевидно, что изучение мантийных плюмов имеет важнейшее прикладное значение практически во всех отраслях народнохозяйственной деятельности страны.

**Гипотеза о существовании Байкальского мантийного плюма.** В настоящее время основным инструментом для изучения мантийных плюмов является регистрация скорости прохождения волн Рэлея. Волны Рэлея — это упругие волны, распространяющиеся в твёрдом теле вдоль его свободной границы и затухающие с глубиной; разновидность поверхностных акустических волн. Их существование было предсказано Дж. У. Рэлеем в 1885 году. Примеры волн Рэлея — это волны на земной поверхности, возникающие при землетрясениях, ультразвуковые и гиперзвуковые поверхностные волны в твёрдых телах, широко применяемые в современных физических исследованиях и технике. Предполагаемое местоположение мантийного плюма окружают сейсмическими станциями. Затем сейсмографами измеряют скорость прохождения волн Рэлея под литосферой после землетрясения. По разности этих скоростей в разных направлениях и осуществляется сейсмическая томография. Так, например, вокруг Йеллоустонской кальдеры установлено

около 50-ти короткопериодных сейсмографов [1], поэтому в настоящее время Йеллоустонский мантийный плюм является наиболее изученным.

Байкальская рифтовая зона — дивергентная граница, расположенная в районе озера Байкал и Восточных Саян. Её центральная часть располагается под озером Байкал. Здесь происходит расхождение земной коры. На западе рифта расположена Евразийская плита, а с востока его ограничивает Амурская плита, движущаяся от рифта в сторону Японии со скоростью около 4 мм в год [8].

Существующая в районе Байкальской рифтовой зоны слабая вулканическая деятельность в виде цепочки недавно потухших вулканов позволяет сделать вывод о том, что под ней существует мантийный плюм. Однако инструментального подтверждения этому нет. Несмотря на то, что вокруг Байкала размещено более 30 сейсмических станций с сейсмографами, работы по сейсмотомографии Байкальского мантийного плюма пока ещё не дали точного ответа на вопрос: - существует ли Байкальский мантийный плюм. Таким образом возникла проблема поиска новых научных методов и инструментов для изучения Байкальского мантийного плюма.

**Решение проблемы.** С 2012 года Иркутский государственный университет путей сообщения и лаборатория инженерной сейсмологии и сейсмогеологии Института земной коры СО РАН ведут совместные исследования по прогнозированию землетрясений в Байкальском регионе. Для разработки метода прогноза землетрясений были использованы статистические данные по концентрации растворенного гелия в подземных водах. По результатам исследований была разработана модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры [9], предложенный способ прогноза землетрясений был запатентован [10]. Для прогноза землетрясений была использована статистика по концентрации растворенного гелия в подземных водах в трёх пунктах водозабора Южного Прибайкалья:

- скважина К-ГИС (г. Иркутск);
- скважина в пос. Зеленый Мыс;
- точка забора гелия в глубинной воде Байкала (пос. Листвянка).

Чтобы отделить неслучайное отклонение показаний концентрации гелия от его случайных изменений, был предложен математический аппарат парных индикаторных функций  $I_{Л-З}(\Delta t_i)$ ,  $I_{Л-К}(\Delta t_i)$ ,  $I_{З-К}(\Delta t_i)$  между пунктами измерения Листвянка – Зеленый Мыс, Листвянка – К-ГИС и Зеленый Мыс – К-ГИС, соответственно:

$$I_{Л-З}(\Delta t_i) = \frac{1}{10\tilde{\sigma}_{H_L}\tilde{\sigma}_{H_3}} \sum_{j=-11}^1 (H_{Лi-j} - \tilde{m}_{H_L})(H_{Зi-j} - \tilde{m}_{H_3}),$$

$$I_{Л-К}(\Delta t_i) = \frac{1}{10\tilde{\sigma}_{H_L}\tilde{\sigma}_{H_K}} \sum_{j=-11}^1 (H_{Лi-j} - \tilde{m}_{H_L})(H_{Ки-j} - \tilde{m}_{H_K}),$$

$$I_{З-К}(\Delta t_i) = \frac{1}{10\tilde{\sigma}_{H_3}\tilde{\sigma}_{H_K}} \sum_{j=-11}^1 (H_{Зi-j} - \tilde{m}_{H_3})(H_{Ки-j} - \tilde{m}_{H_K}).$$

где  $H_{Лi}$ ,  $H_{Зi}$  и  $H_{Ки}$  - текущие (1 раз в сутки) измерения концентрации гелия в Листвянке,

на Зеленом Мысе и К-ГИС, соответственно;  $\tilde{\sigma}_{H_L} = \sqrt{\frac{1}{N_L - 1} \sum_{i=1}^{N_L} (H_{Лi} - \tilde{m}_{H_L})^2}$ ,

$\tilde{\sigma}_{H_3} = \sqrt{\frac{1}{N_3 - 1} \sum_{i=1}^{N_3} (H_{Зi} - \tilde{m}_{H_3})^2}$  и  $\tilde{\sigma}_{H_K} = \sqrt{\frac{1}{N_K - 1} \sum_{i=1}^{N_K} (H_{Ки} - \tilde{m}_{H_K})^2}$  - среднеквадратическое

отклонение (СКО) измерений концентрации гелия в Листвянке, на Зеленом Мысе и К-ГИС,

соответственно;  $\tilde{m}_{H_L} = \frac{1}{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} H_{Li}$ ,  $\tilde{m}_{H_3} = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} H_{3i}$  и  $\tilde{m}_{H_K} = \frac{1}{N_K} \sum_{i=1}^{N_K} H_{Ki}$  - средние значения измерений концентрации гелия в Листвянке, на Зеленом Мысе и К-ГИС, соответственно;  $N_L$ ,  $N_3$ ,  $N_K$  - число измерений концентрации гелия в Листвянке, на Зеленом Мысе и К-ГИС за весь период наблюдения с 2007 года по настоящее время, соответственно.

Выполненные исследования и модель [9] позволили сделать вывод о том, что парные индикаторные функции  $I_{L-3}(\Delta t_i)$ ,  $I_{L-K}(\Delta t_i)$ ,  $I_{3-K}(\Delta t_i)$  характеризуют давление горных пород внутри тектонических плит в районе Прибайкалья.

В рамках продолжения этих исследований был выполнен спектральный анализ скорости изменения давления горных пород внутри тектонических плит в районе Прибайкалья. В ходе этих исследований были изучены функции текущего энергетического спектра  $S_x(f)$  различных наблюдаемых переменных (сигналов)  $x(t)$  вида

$$S_x(f) = \left| \int_0^{T_H} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \right|^2,$$

где  $f$  - частота изменения гармоник сигнала  $x(t)$ , 1/сутки;  $j$  - мнимая единица — комплексное число, квадрат которого равен  $-1$  (минус единице);  $T_H$  - период наблюдения сигнала  $x(t)$ .

Спектры парных индикаторных функций  $I_{L-3}(\Delta t_i)$ ,  $I_{L-K}(\Delta t_i)$ ,  $I_{3-K}(\Delta t_i)$  приведены на рис. 4.

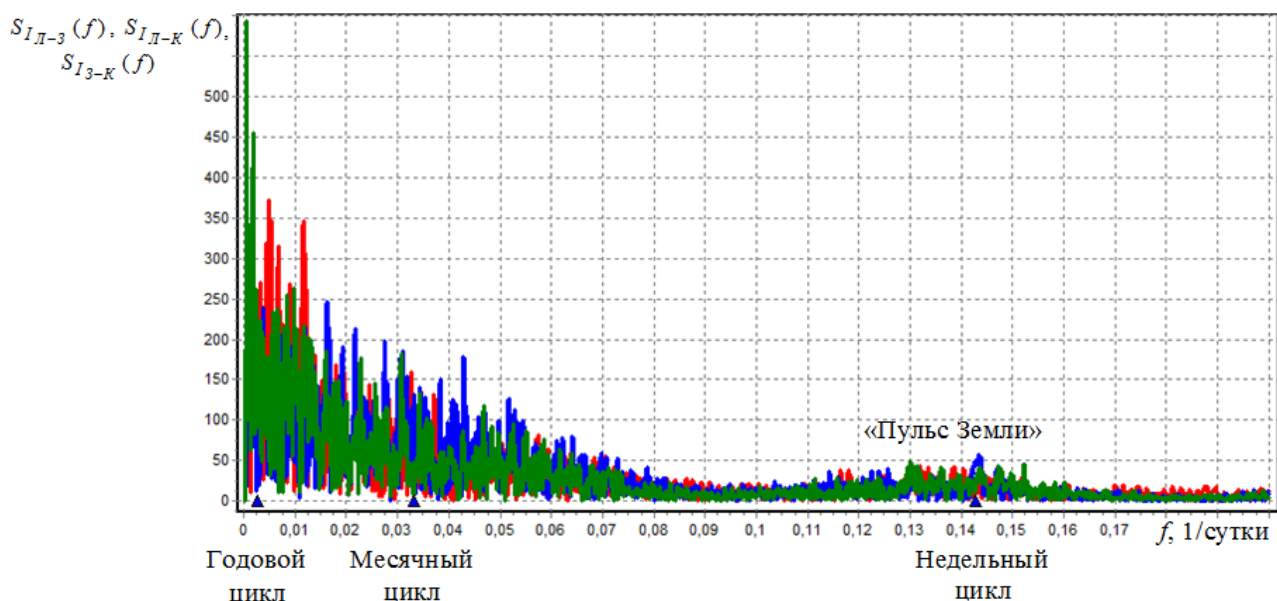


Рис. 4. Текущие энергетические спектры парных индикаторных функций

Исследования показали, что все парные индикаторные функции имеют явно выраженный максимум колебаний с периодичностью примерно одна неделя. Это явление было названо нами «Пульс Земли» [11]. Также было установлено, что амплитуда этих колебаний несколько возросла в период, предшествующий Култукскому землетрясению с энергетическим классом 15,9, произошедшем 27.08.2008 года, и сразу после него.

Более ярко такой максимум колебаний амплитуд с периодом примерно в одну неделю был выявлен по парной индикаторной функции  $I_{3-3}(\Delta t_i)$  между концентрацией инертных газов радона и гелия (рис. 5):

$$I_{3-3}(\Delta t_i) = \frac{1}{10\tilde{\sigma}_{R_3}\tilde{\sigma}_{H_3}} \sum_{j=-11}^1 (R_{3i-j} - \tilde{m}_{R_3})(H_{3i-j} - \tilde{m}_{H_3}),$$

где  $R_{3i}$  - текущие (1 раз в сутки) измерения концентрации радона в скважине на Зеленом Мысе;  $\tilde{\sigma}_{R_3}$  и  $\tilde{m}_{R_3}$  - СКО и среднее значение измерений концентрации радона в скважине на Зеленом Мысе за период наблюдения с 01.06.2009 по 07.01.2014.

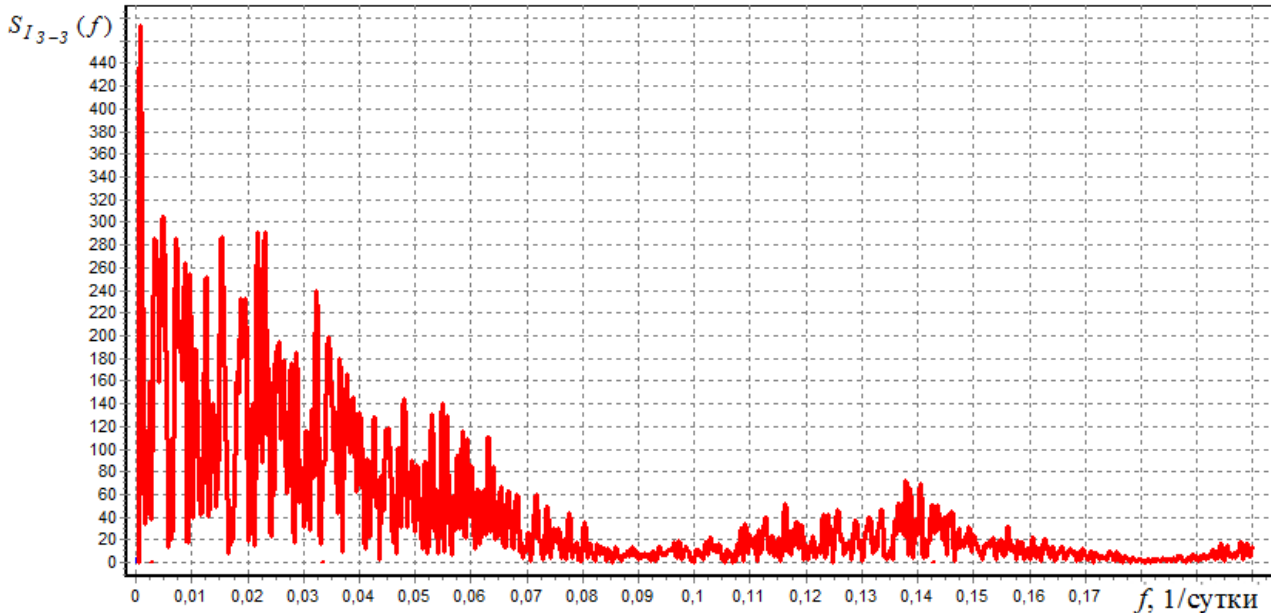


Рис. 5. Текущий энергетический спектр парной индикаторной функции  $I_{3-3}(\Delta t_i)$  между концентрацией инертных газов радон и гелий, измеренной в скважине на Зеленом Мысе за период наблюдения с 01.06.2009 по 07.01.2014

Во всех изученных случаях наблюдения за концентрацией растворенных газов радона и гелия в подземных водах Южного Прибайкалья максимум амплитуды колебаний парных индикаторных функций приходится на период колебаний примерно 7,14-7,25 суток.

Как уже было сказано выше, парные индикаторные функции характеризуют давление горных пород внутри тектонических плит в районе Прибайкалья. Выявленные колебания давления в земной коре с постоянной, не меняющейся за весь период наблюдения частотой, невозможно объяснить тектоническими процессами. Поскольку эти процессы односторонни (только растяжение) и скачкообразны, так как проявляются только в виде сейсмических толчков.

Единственное разумное объяснение периодических колебаний давления в земной коре Южного Прибайкалья заключается в том, что эти колебания вызваны динамикой действия Байкальского плюма.

Любой мантийный плюм представляет собой вертикальный поток твёрдого вещества нижней мантии, раскалённого до 1600-2000°C. При выходе в литосферу давление внутри этого вещества уменьшается, и оно расплавляется, образуя магму. Если у магмы есть возможность выйти на поверхность, то она изливается на поверхность в виде лавы. При этом возможны три основных варианта взаимодействия мантийного плюма и литосферы.

Если имеется магматический канал, пересекающий литосферу насквозь, то происходит извержение в виде непрерывного спокойного истечения лавы. Так, например, вулкан Килауэа на «Большом острове» Гавайи постоянно извергается, начиная с 1983 года. 251 млн лет назад Сибирские траппы образовались в результате непрерывного извержения Виллойского мантийного плюма на протяжении примерно 10 тыс. лет.

Если магматический канал пересекает литосферу не насквозь, то в нижней коре над головкой мантийного плюма образуется магматический резервуар. Когда давление в магматическом резервуаре превышает давление лежащей на нём литосферы, то происходит извержение взрывного типа, как, например, взрыв Йеллоустоунского супервулкана. Первое из трёх гигантских извержений супервулкана Йеллоустон произошло 2,1 млн лет назад и сформировало кальдеру Айленд-Парк, а также образовало туфовые отложения Хаклберри-Ридж. Тогда от взрывов распались горные цепи, выбросы поднялись на высоту 50 км — до верхней границы стратосферы; вулканический пепел покрыл более четверти территории Северной Америки. Этот взрыв супервулкана превышает по мощности все взрывы вулканов в истории человечества.

Если магматический канал не успел глубоко внедриться в литосферу, то её вес превышает давление вещества нижней мантии в канале мантийного плюма и закупоривает верхний выход из него. Однако из-за непрерывного поступления вещества нижней мантии, давление в закупоренном канале мантийного плюма начинает расти и в какой-то момент превышает вес литосферы. Происходит её подъём и вещество нижней мантии изливается в стороны от вертикальной оси канала мантийного плюма. После этого давление в канале мантийного плюма падает, литосфера опускается и выход вещества нижней мантии прекращается. После этого цикл подъёма и спуска литосферы повторяется.

Таким образом, на основании выполненных исследований можно утверждать, что выявленные постоянные периодические колебания давления горных пород внутри тектонических плит в районе Прибайкалья вызваны взаимодействием мантийного плюма и литосферы третьего вида с периодом колебаний примерно в одну неделю.

**Заключение.** Выполненная научная работа позволила создать математический аппарат и реализованный на практике метод исследования мантийных плюмов, позволяющий эффективно дополнить существующий метод сейсмотомографии. Достоинство предлагаемого метода в том, что он намного проще метода сейсмотомографии и требует меньших финансовых затрат. Для полномасштабного исследования мантийного плюма предлагаемым методом необходимо только наличие сети скважин для забора проб на радон и гелий. Для построения текущего энергетического спектра наблюдение за концентрацией инертных газов в подземных водах достаточно провести в течении полугода наблюдений за каждой скважиной. При этом наблюдение за скважинами необязательно проводить одновременно.

Согласно выполненным исследованиям на территории Байкальского региона непрерывно действует знакопеременное вертикальное движение литосферы. Поэтому отдельный народнохозяйственный интерес представляют исследования влияния этих колебательных движений литосферы на масштабные строительные объекты железной дороги: мосты, насыпи, эстакады и т.п.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nataf H.C. Seismic imaging of mantle plumes. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2000. v. 28, p. 391–417.
2. Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и строение, пер. с англ. — М., 1960.
3. Clague D.A., Dalrymple G. B. *Geologic evolution: The Hawaiian-Emperor volcanoc chain // Volcanism in Hawaii.* Washington: Governmental printong office, 1987. P. 5-54.
4. Плечов П.Ю. 12 фактов о вулканологии // Журнал «Троицкий вариант» №12(81), 21 июня 2011 года.
5. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Глубинная геодинамика, или как работает мантия Земли // журнал НАУКА из первых рук, Декабрь 2011, № 6(42) с. 19—35.
6. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Журнал Геология и геофизика, 2014, т. 55, № 2, с. 153—184.



7. Божко Н.А. Суперконтинентальная цикличность в истории Земли // Вестн. Моск. Ун-та. Сер.4. Геология. 2009 №2. С. 13-27.
8. Иванов А. Геология Байкала. Рифтовая зона байкальская // Иркипедиягу [http://irkipedia.ru/content/geologiya\\_baykala\\_riftovaya\\_zona\\_baykalskaya](http://irkipedia.ru/content/geologiya_baykala_riftovaya_zona_baykalskaya).
9. Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. Модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры // Журнал Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 165–175.
10. Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. Способ гидрогеохимического определения времени возникновения землетрясений в Южном Прибайкалье. Патент на изобретение RU № 2601403С2. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Опубликовано 10.11.2016. Бюл. № 31
11. Семёнов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. Прогноз землетрясений. Почему молчат ученые? // Российская академия наук. Журнал «Природа» – № 5(1221) май 2017. – С. 18-28.

## REFERENCES

1. Nataf H. C. Seismic imaging of mantle plumes. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2000. V. 28, p. 391-417.
2. Jeffries G. Earth, its origin, history and structure, lane.from English. - M., 1960.
3. Clague D. A., Dalrymple G. B. Geologic evolution of The Hawaiian-Emperor chain volcanoc // Volcanism in Hawaii. Washington: government printong office, 1987. P. 5-54.
4. Plechov P. Yu. 12 facts about Volcanology // «Troitsky variant» No. 12(81), 21 June 2011.
5. Kuzmin M. I., Yarmolyuk, V. V., Deep-seated geodynamics, or how does the Earth's mantle // SCIENCE first hand, December 2011, No. 6(42) pp. 19-35.
6. Kuzmin M. I., Yarmolyuk, V. V., Mantle plumes northeast Asia and their role in formation of endogenous deposits // Geology and Geophysics, 2014, vol 55, No. 2, pp. 153-184.
7. Bozhko N. Ah. Supercontinent cyclicality in the history of the Earth // Vestn. Mosk. UN-TA. Ser.4. Geology. 2009 №2. P. 13-27.
8. Ivanov A. Geology Of Lake Baikal. The Baikal rift zone // Ikipedia [http://irkipedia.ru/content/geologiya\\_baykala\\_riftovaya\\_zona\\_baykalskaya](http://irkipedia.ru/content/geologiya_baykala_riftovaya_zona_baykalskaya).
9. Semenov R. M., Kashkovsky V. V., Lopatin M. N. Model of preparation and realization of tectonic earthquake and its precursors in the conditions of stretching of the earth's crust // journal of Geodynamics and Tectonophysics. 2018. Vol. 9. No. 1. P. 165-175.
10. Semenov R. M., Kashkovsky V. V., Lopatin M. N. A method of hydrogeochemical determination of the time of occurrence of earthquakes in the southern Baikal. Patent for invention RU № 2601403С2. Federal service for intellectual property. Published 10.11.2016. Bul. No. 31
11. Semenov R. M., Kashkovsky V. V., Lopatin M. N. Earthquake prediction. Why scientists are silent? // Russian Academy of Sciences. Journal «Nature» - № 5(1221) may 2017. - P. 18-28.

## Информация об авторах

*Виктор Владимирович Кашковский* - д.т.н., с.н.с., профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [kww542339@km.ru](mailto:kww542339@km.ru)

*Рудольф Михайлович Семёнов* - д.г.-м.н, профессор, в.н.с. лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии, Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск; профессор кафедры «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [semenov@crust.irk.ru](mailto:semenov@crust.irk.ru)

## Authors

*Victor Vladimirovich Kashkovsky*– doctor of technical Sciences, associate Professor in the specialty, Professor of the Department «Information systems and information protection», Irkutsk state University of railway engineering, Irkutsk, e-mail: [kww542339@km.ru](mailto:kww542339@km.ru)

*Rudolf Mikhailovich Semenov*— doctor of geological and mineralogical Sciences, Professor, leading researcher laboratory of engineering seismology and seismology, Institute of the earth's crust SB RAS, Irkutsk; Professor of the Department «construction of Railways, bridges and transport tunnels», Irkutsk state University of Railways, Irkutsk, e-mail: [semenov@crust.irk.ru](mailto:semenov@crust.irk.ru)

#### **Для цитирования**

Кашковский В.В., Семенов Р.М. Применение спектрального анализа концентрации растворенных инертных газов в подземных водах для исследования глубинной геодинамики // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2018. – №1. – С. 38-47 – Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/11-2018>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 01.10.2018)

#### **For citation**

Kashkovsky V. V., Semenov R. M. Primenenie spektral'nogo analiza koncentracii rastvorenykh inertnykh gazov v podzemnykh vodah dlja issledovaniya glubinnoj geodinamiki [Application of spectral analysis of the concentration of dissolved inert gases in groundwater for the study of deep geodynamics] // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the man-agement of complex systems: electronic scientific journal], 2018. No. 1. P. 38-47. [Accessed 01/10/18]