

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ НА ПРИМЕРЕ РИФТОГЕНЕЗА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

В.В. Кашиковский, К.А. Емельянова

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск Россия

Аннотация. Иркутская область имеет весьма развитую транспортную сеть. Для успешной эксплуатации данной транспортной сети важен учёт рисков, вызванных активной сейсмической активностью Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) и сейсмическое районирование стационарных объектов и сооружений транспортной сети. Для этого необходим мониторинг сейсмической активности БРЗ и её прогноз. Поиск новых гидрогеохимических методов прогноза землетрясений на основе изменения концентрации растворенных радона и гелия в подземных водах и применения современных информационных технологий привёл нас к созданию модели подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников. Предложенная модель основана на том, что причиной возникновения всех предвестников землетрясения является расход тектонической энергии на пластическую деформацию в горных породах на протяжении 2-3 лет перед землетрясением. На основании этой модели был разработан математический аппарат парных индикаторных функций, сигнализирующих о приближении землетрясения. Для практической реализации предложенного математического аппарата было разработано программное обеспечение и выполнена оценка его практической применимости. Дальнейшим развитием данных исследований стал поиск признаков существования Байкальского плюма.

Существует гипотеза о том, что в районе БРЗ имеется малое ответвление плюма от Центральнo-Азиатской области внутриплитового магматизма. Однако объективных доказательств этому до настоящего времени не было. Спектральный анализ парных индикаторных функций выявил непрерывные периодические колебания давления внутри земной коры в районе Южного Прибайкалья, которые можно рассматривать как доказательство существования Байкальского плюма. Полученные результаты позволяют предположить, что вызванные Байкальским плюмом термические процессы глубинной геодинамики, выражаются в смещении юго-восточного блока БРЗ на восток в юго-восточном направлении и являются первопричиной высокой сейсмической активности Прибайкалья.

Ключевые слова: спектральный анализ, прогноз землетрясений, глубинная геодинамика, плюмы, Байкальская рифтовая зона.

APPLICATION OF THE SPECTRAL METHOD FOR THE STUDY OF DEEP GEODYNAMICS ON THE EXAMPLE OF RIFTOGENESIS OF THE BAIKAL RIFT ZONE

V.V. Kashkovsky, K.A. Emelyanova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Abstract. Irkutsk region has a very developed transport network. For the successful operation of this transport network, it is important to take into account the risks caused by the active seismic activity of the Baikal Rift Zone (BRZ) and seismic zoning of stationary objects and structures of the transport network. This requires monitoring of the seismic activity of the BRZ and its forecast. The search for new hydrogeochemical methods of earthquake prediction based on changes in the concentration of dissolved radon and helium in groundwater and the use of modern information technologies led us to create a model for the preparation and implementation of a tectonic earthquake and its precursors. The proposed model is based on the fact that the cause of all earthquake precursors is the consumption of tectonic energy for plastic deformation in rocks for 2-3 years before the earthquake. Based on this model, a mathematical apparatus of paired indicator functions signaling the approach of the earthquake was developed. For the practical implementation of the proposed mathematical apparatus, software was developed and its practical applicability was evaluated. A further development of these studies was the search for signs of the existence of the Baikal plume.

There is a hypothesis that in the BRZ region there is a small branch of the plume from the Central Asian region of intraplate magmatism. However, there has been no objective evidence of this to date. Spectral analysis of paired indicator functions revealed continuous periodic pressure fluctuations inside the Earth's crust in the Southern Baikal region, which can be considered as proof of the existence of the Baikal plume. The obtained results suggest that the thermal processes of deep geodynamics caused by the Baikal plume are expressed in the displacement of the southeastern block of the BRZ to the east in the southeastern direction and are the root cause of the high seismic activity of the Baikal region.

Keywords: spectral analysis, earthquake prediction, deep geodynamics, pros, Baikal rift zone.

Введение

В 60-е годы XX столетия, при создании основ такой науки как тектоника плит, было замечено, что действующие вулканы внутри океанических плит образуют вулканические цепи. Особенностью таких вулканических цепей является то, что вулканы в них хронологически поочередно (в геологическом масштабе времени) сначала возникают, а затем через какое-то время затухают последовательно один за другим на протяжении всей цепи. Ярким примером такой вулканической цепи являются вулканы Гавайско-Императорского хребта, существующего около 100 млн. лет [1]. На основании этих наблюдений было сделано предположение, что возникновение вулканических цепей вызвано перемещением подвижных литосферных плит над неподвижными горячими точками мантии, прожигающими литосферу по мере прохождения её над ними.

В начале 70-х годов XX столетия Джейсон Морган предложил гипотезу мантийных плюмов [2], позволяющую объяснить существование вулканов в таких горячих точках как, например, Гавайи.

Согласно современным воззрениям [3] Земля имеет в первом приближении форму шара, у которого экваториальный диаметр составляет 12754 км, а полярный — около 12711 км. Она состоит из нескольких оболочек, выделенных по химическим или реологическим свойствам. 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. Температура внутреннего ядра Земли - 5000°C, внешнего ядра - 4000°C, температура нижней мантии в зависимости от глубины колеблется от 3000°C до 2000°C.

Таким образом, между ядром и поверхностью Земли существует перепад температур в диапазоне примерно 5000°C. Этот перепад температур является причиной возникновения конвекционных вертикальных потоков вещества мантии от слоя D'' к поверхности Земли (например, [4]). Благодаря процессу общемантийной конвекции «холодное» субдуцированное вещество в виде нисходящих потоков погружается вглубь мантии Земли. В свою очередь восходящий подъем горячей мантии происходит в виде мантийных плюмов. На поверхности Земли такие мантийные струи проявляются как горячие точки мантии, которые формируют в океанах океанические плато и острова, на континентах — траппы, внутриплитные магматические ареалы, в том числе некоторые рифты и вулканические своды [4].

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 [5]. 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 сейсмоотомографии [2, 6, 7, 8]. Именно суперплюмы ответственны за возникновение и распад суперконтинентов [4].

По современным представлениям [9] земная кора постоянно переконфигурируется в ходе суперконтинентальных циклов: её блоки движутся относительно друг друга, что приводит к периодическому перемещению, столкновению и распаду континентов. Доказано, что возникновение и распад суперконтинентов согласуется с циклами активности суперплюмов. Согласно [10] за последние 3 млрд. лет возникло и распалось пять суперконтинентов.

Благодаря плюму был образован Гавайский архипелаг, состоящий из 24 островов и атоллов. 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. Гавайская вулканическая цепочка начинается от горы Мейджи (остров вблизи Камчатки, возраст ~70 млн.

лет), затем она включает в себя Императорские горы (возраст 70-40 млн. лет) и заканчивается островами Гавайского архипелага [1]. Самый старый из надводных островов — Мидуэй, ему 28,3 млн. лет [11].

В настоящее время, не смотря на наличие скептиков, теория плюмов развивается и находит всё новые и новые подтверждения, тогда как альтернативные гипотезы скептиков сталкиваются со всё большими противоречиями [12].

По следам горячих точек возможно восстановить движение тектонических плит. Для нас наибольший теоретический и практический интерес представляет Сибирский континент. Реконструкция его движения [13] показала, что примерно 570 млн. лет назад он дрейфовал над Африканским суперплюмом, а затем на интервале времени от 300 до 180 млн. лет назад весь Сибирский континент от современного Охотского моря до нынешнего о. Врангеля был пересечён по дуге Исландским (Сибирским трапповым или Вильюйским) плюмом [6]. Благодаря мощным многолетним извержениям Исландского плюма на Восточно-Сибирской платформе были образованы Сибирские траппы — одна из самых крупных трапповых провинций мира [10]. Существующие возрастные оценки свидетельствуют о том, что в целом Сибирская трапповая провинция сформировалась в очень узком возрастном диапазоне 250—248 млн. лет [10]. Сибирские траппы развиты на площади свыше 1 500 000 км², а их объем равен примерно 1.5 млн. км³ [10]. Существуют обоснованные предположения, что Сибирский континент, в частности такая его часть как Байкальская рифтовая зона (БРЗ), и в настоящее время находится в зоне влияния мантийного плюма. Поэтому в плане научных исследований плюмов одним из наиболее интересных регионов не только Сибирского континента, но и в мире является БРЗ.

В целом, несмотря на то, что рифтообразованию БРЗ посвящено большое количество работ, нельзя сказать, что эта тема раскрыта полностью. Особый интерес для научных исследований в этом направлении представляет инструментальное изучение влияния плюма на современное формирование БРЗ. Рассмотрению одного из аспектов этого научного направления и посвящена данная работа

Модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры

Такие смежные научные дисциплины как глубинная геодинамика и сейсмология предполагают наличие общих методов исследования. К таковым можно, например, отнести исследование влияния тектонических процессов и сейсмических событий на химический состав подземных вод.

К настоящему времени учёными сейсмологами выполнен большой объём исследований по моделированию разрушающих воздействий внешних сил на образцы горных пород, например, [14] и др. Это позволило разработать ряд моделей, объясняющих те или иные особенности подготовки и реализации тектонического землетрясения. Одной из них является дилатантно-диффузионная модель подготовки и реализации тектонического землетрясения [15]. Данную модель используют, в первую очередь, для объяснения возникновения гидро-геохимических предвестников землетрясений на основе изменения концентрации растворенных радона и гелия в подземных водах, уровня и дебита термальных источников и т.п. Недостатком данной модели является то, что она не учитывает пластичность горных пород при подготовке и реализации тектонического землетрясения. Поэтому до настоящего времени в каждом конкретном случае произошедшего землетрясения проявление или не проявление его многих предвестников не находило должного научного объяснения.

С 2012 года Иркутский государственный университет путей сообщения 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 предложена модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры [16]. Отличительной чертой предложенной модели и спо-

соба прогноза землетрясений является то, что они основаны на влиянии пластичности горных пород при подготовке землетрясения на появление его предвестников.

Пластичность горных пород – это способность породы необратимо изменять без нарушения сплошности свою форму и размеры под действием внешних усилий. В области пластических деформаций полностью нарушается прямая пропорциональная зависимость между деформациями породы и нагрузкой, деформации горной породы становятся необратимыми. С точки зрения сейсмологии важной особенностью является то, что при возникновении пластической деформации в пластах горных пород наблюдается увеличение скорости роста деформаций при неизменном влиянии внешних сил.

Исследования механизма пластической деформации в горных породах наиболее востребованы в горном деле. Без учёта пластической деформации в горных породах невозможны расчёт и проектирование бурильных установок и других камнережущих инструментов, проведение взрывных работ и т.п.

Наиболее вероятный механизм пластической деформации в горных породах — межзёрненное скольжение (сдвиг зёрен по определенным плоскостям и направлениям под действием напряжений) [17].

Пластическая деформация твёрдых тел происходит без нарушения сплошности вещества. В горных породах наряду с этим наблюдается взаимное перемещение довольно больших объемов породы, обжатие, смятие и т.п. Таким образом, довольно часто явления пластичности, рассматриваемые в горных породах, не совпадают с понятием пластичности, существующим в физике твёрдого тела, так как, строго говоря, ряд явлений, вызывающих в породах остаточные деформации, следует отнести к разрушающим (квазипластичность) [17].

Для описания связей между деформациями и напряжениями в пластической области пользуются различными механическими моделями деформирования тел, например, упруго-вязкая модель твёрдого тела Кельвина – Фойгта, упруго-вязкая модель Максвелла, пластичная модель Сен-Венана и др. [17].

В горном деле для оценки твердости, упругости и пластических характеристик горных пород применяют метод Л.А. Шрейнера [18] По методу Л.А. Шрейнера в образец горной породы с двумя плоско-параллельными плоскостями вдавливается штамп в форме цилиндра или усеченного конуса с плоским основанием. При этом регистрируется нагрузка на штамп P и глубина его внедрения [17].

В основе разработанной модели подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры [16, 19] лежит представление о том, что с учётом пластичности горных пород их растяжение от начала действия растягивающих тектонических сил до возникновения магистрального разрыва выглядит примерно так, как показано на рис. 1.

На рис. 1 площадь фигуры ADE

$$S_{ADE} = \frac{1}{F_{\max}} \int_0^{\Delta l_{\text{полн}}} F(l) dl,$$

характеризует общую относительную энергию, необходимую для формирования гипоцентра землетрясения и разрушения в нем пластов горных пород.

Площадь фигуры ABC

$$S_{ABC} = \frac{1}{F_{\max}} \int_0^{\Delta l_{\text{упр}}} F(l) dl,$$

характеризует относительную упругую энергию пластов горных пород, которая после их разрыва преобразуется в энергию землетрясения.

Соответственно площадь фигуры CBDE

$$S_{CBDE} = \frac{1}{F_{\max}} \int_{\Delta l_{\text{упр}}}^{\Delta l_{\text{полн}}} F(l) dl,$$

пропорциональна относительной энергии, необходимой для пластической деформации пластов горных пород вблизи гипоцентра.

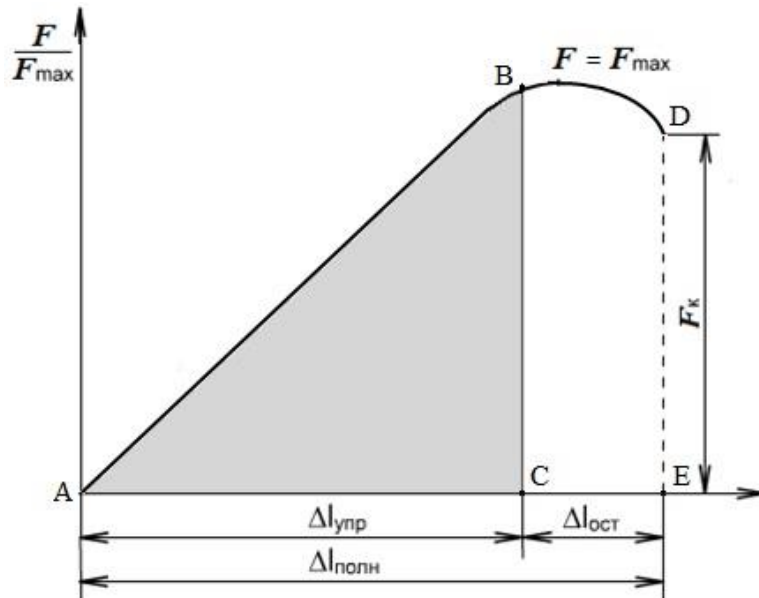


Рис. 1. Примерная диаграмма растяжения пластов горных пород на разрыв перед землетрясением.

На рис. 1 обозначены:

$\Delta l_{\text{полн}}$ – полное приращение длины пластов горных пород перед их разрывом;

$\Delta l_{\text{упр}}$ – величина упругого растяжения пластов горных пород при разрыве;

$\Delta l_{\text{ост}}$ – величина остаточного суммарного приращения длины пластов горных пород после разрыва;

F_{\max} – растягивающая сила, соответствующая пределу прочности пластов горных пород в районе гипоцентра землетрясения.

F_k – растягивающая сила истинного сопротивления пластов горных пород разрушению.

Соотношение площади S_{ADE} к площади S_{ABC} характеризует пластичность горных пород вблизи гипоцентра. В горном деле это соотношение называется коэффициентом пластичности горных пород [17]:

$$K_{\text{пш}} = \frac{A_p}{A_{\text{упр}}},$$

где $A_{\text{упр}} = \int_0^{\Delta l_{\text{упр}}} F(l) dl$ – работа упругих деформаций при разрушении образца горных пород;

$$A_p = \int_0^{\Delta l_{\text{полн}}} F(l) dl \text{ - общая работа по разрушению образца.}$$

Далее будем исходить из того, что коэффициенты пластичности, полученные при измерении твёрдости горных пород по методу Л.А. Шрейнера, коррелированы с показателями

пластичности соответствующих горных пород в зоне подготовки и реализации очага землетрясения.

Анализ исходных данных показывает, что энергия, необходимая для пластической деформации горных пород перед возникновением магистрального разрыва в очаге землетрясения, достаточно велика по сравнению с общей энергией, затраченной на подготовку и реализацию землетрясения. При коровой сейсмичности, очаги землетрясений, в зависимости от их глубины, располагаются в гранитном или базальтовом слоях земной коры.

По данным Л.А. Шрейнера [18] $K_{\text{пл}}$ для гранита составляет от 1.4 до 1.9, а по данным [17] до 2.76 в зависимости от разновидности гранита. Для базальта $K_{\text{пл}}=4.2$. Из этого, например, следует, что при магнитуде землетрясения 8 и очаге землетрясения, находящемся в гранитном слое с $K_{\text{пл}}=2$, ещё примерно 8 условных единиц магнитуды дополнительной энергии будет израсходовано на пластическую деформацию горных пород. Разница только в том, что при магнитуде 8 упругая энергия ($A_{\text{упр}}$) будет выделена практически мгновенно при землетрясении, а еще 8 условных единиц магнитуды дополнительной энергии будут потрачены на пластическую деформацию горных пород перед землетрясением на протяжении примерно двух – трёх лет. Очевидно, что именно эта дополнительная энергия на пластическую деформацию горных пород и является причиной возникновения всех без исключения предвестников землетрясения (специфическое проявление сейсмической активности перед землетрясением, земное электричество, уровень воды в колодцах и скважинах, изменение химического состава вод и газов, поведение животных и т.п.) [16, 19, 20, 21].

Существующими техническими средствами невозможно измерить величину тектонической силы $F(\Delta l)$ в гипоцентре будущего землетрясения. Можно только вычислить её оценку:

$$F(\Delta l) = P(\Delta l)S_p$$

где $P(\Delta l)$ - давление внутри гипоцентра; S_p - поперечная площадь скола магистрального разрыва.

Строго говоря, при землетрясении, вызванном растяжением горных пород по линии разлома, давление $P(\Delta l)$ будет отрицательным, однако далее для упрощения изложения знак минус мы будем опускать.

Падение давления горных пород в области очага будущего землетрясения (см. участок F – D на рис. 1) приводит к раскрытию трещин, всегда имеющих в горных породах, что, в свою очередь, приводит к изменению концентрации радона и гелия в подземных водах [16], дебита источников и уровней воды в колодцах и скважинах [21] и т.п.

Анализ сейсмической активности и статистических данных по концентрациям радона и гелия в подземных водах в районе БРЗ позволили высказать предположение, что гарантированным и достоверным предвестником землетрясения является падение давления от P_{max} до $P_{\text{к}}$ в гипоцентре будущего землетрясения (см. соответствующие силы F_{max} и $F_{\text{к}}$ на рис. 1), выраженное через изменение концентрации радона и гелия в подземных водах. По нашим наблюдениям продолжительность этого периода падения давления составляет от недели до одного – двух месяцев и зависит от магнитуды землетрясения. То есть, чем выше магнитуда землетрясения, тем дольше продолжается период падения давления горных пород в гипоцентре до его начала.

Так же на основании выполненного анализа в качестве достоверного предвестника для предсказания землетрясений в районе БРЗ было предложено использовать проявление перед землетрясением корреляционной зависимости в концентрации растворенного гелия в подземных водах пространственно-разнесённых пунктах замера. Для этого были использованы измерения концентрации гелия в трёх пунктах водозабора Южного Прибайкалья: - скважина

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

Вначале нами были исследованы корреляционные зависимости между парными измерениями концентрации гелия в различных источниках:

$$\bar{r}_{Л-З} = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{H_{Л}} \tilde{\sigma}_{H_{З}}} \sum_{i=1}^N (H_{Лi} - \tilde{m}_{Л})(H_{Зi} - \tilde{m}_{З});$$

$$\bar{r}_{Л-К} = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{H_{Л}} \tilde{\sigma}_{H_{К}}} \sum_{i=1}^N (H_{Лi} - \tilde{m}_{Л})(H_{Ки} - \tilde{m}_{К});$$

$$\bar{r}_{З-К} = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{H_{З}} \tilde{\sigma}_{H_{К}}} \sum_{i=1}^N (H_{Зi} - \tilde{m}_{З})(H_{Ки} - \tilde{m}_{К})$$

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; N - число парных измерений концентрации гелия за весь период наблюдения с 2007 года по настоящее время;

$$\tilde{\sigma}_{H_{Л}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H_{Лi} - \tilde{m}_{Л})^2},$$

$$\tilde{\sigma}_{H_{З}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H_{Зi} - \tilde{m}_{З})^2} \text{ и}$$

$$\tilde{\sigma}_{H_{К}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H_{Ки} - \tilde{m}_{К})^2} \text{ - среднеквадратическое отклонение (СКО) измерений}$$

концентрации гелия в Листвянке, на Зеленом Мысе и К-ГИС, соответственно;

$$\tilde{m}_{H_{Л}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{Лi}, \tilde{m}_{H_{З}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{Зi}, \tilde{m}_{H_{К}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{Ки},$$

- средние значения измерений концентрации гелия в Листвянке, на Зеленом Мысе и К-ГИС, соответственно.

По результатам вычислений было получено:

$$\bar{r}_{Л-З} = 0.1218 \text{ (расстояние Листвянка - Зеленый Мыс 36 км);}$$

$$\bar{r}_{Л-К} = 0.0334 \text{ (расстояние Листвянка - К-ГИС 65 км);}$$

$$\bar{r}_{З-К} = 0.1593 \text{ (расстояние Зеленый Мыс - К-ГИС 29 км).}$$

Из этого следует, что при отсутствии сейсмической активности показания гелия в наблюдаемых источниках независимы, с увеличением расстояния между источниками коэффициент корреляции падает.

Изменение давления от P_{\max} до $P_{\text{к}}$ в гипоцентре будущего землетрясения влияет на концентрацию гелия в подземных водах в весьма обширном окружающем регионе. По нашим наблюдениям изменение концентрации гелия наблюдаются на расстояниях до 600 и более километров зависимости от магнитуды и характера горных пород между точкой измерения и гипоцентром. 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:

$$I_{L-3}(t_i) = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{H_L} \tilde{\sigma}_{H_3}} \sum_{j=-10}^0 (H_{Li-j} - \tilde{m}_L)(H_{3i-j} - \tilde{m}_3);$$

$$I_{L-K}(t_i) = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{H_L} \tilde{\sigma}_{H_K}} \sum_{j=-10}^0 (H_{Li-j} - \tilde{m}_L)(H_{Ki-j} - \tilde{m}_K);$$

$$I_{3-K}(t_i) = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{H_3} \tilde{\sigma}_{H_K}} \sum_{j=-10}^0 (H_{3i-j} - \tilde{m}_3)(H_{Ki-j} - \tilde{m}_K).$$

Каждая парная индикаторная функция представляет собой выраженное одной точкой окно наблюдения за парными измерениями концентраций гелия в двух пунктах. Ширина окна (11 суток) подобрана опытным путём.

Выполненные исследования и модель [16] позволили сделать вывод о том, что парные индикаторные функции $I_{L-3}(t_i)$, $I_{L-K}(t_i)$, $I_{3-K}(t_i)$ характеризуют изменения давления горных пород внутри тектонических плит в районе Прибайкалья. Полученные графики изменения $I_{L-3}(t_i)$, $I_{L-K}(t_i)$, $I_{3-K}(t_i)$ образуют неповторяющиеся информационные структуры вблизи сейсмических событий, позволяющие делать среднесрочный прогноз землетрясений.

Главное достоинство предложенного метода среднесрочного прогноза землетрясения заключается в том, что за всё время наблюдения не было ни одного случая ложной тревоги или пропуска событий. В целом следует отметить, что дешифрирование информационных структур парных индикаторных функций и их привязка к тектоническим процессам и сейсмическим событиям является перспективной тематикой дальнейших научных исследований.

Гипотеза о существовании Байкальского мантийного плюма

Общее структурное положение и развитие БРЗ определяются в первую очередь его связью с зоной сочленения двух главных литосферных мезоплит Восточной Сибири, имеющих контрастные термомеханические свойства, — докембрийского Сибирского кратона и Центрально-Азиатского подвижного пояса. Центральный сегмент зоны, представленный самой крупной Байкальской впадиной, расположен непосредственно у края кратона и протягивается на 680 км, составляя треть полной длины рифтовой зоны. Наиболее тесно с краем кратона согласуется Южно-Байкальская впадина, которая начинает отдаляться от него под очень острым углом в районе устья р. Бугульдейка в связи с ответвлением здесь Ольхонского разлома, являющегося главным краевым разломом Южно-Байкальской впадины. Подобным же образом от края кратона отклоняется северо-восточная оконечность Северо-Байкальской впадины. Восточнее Байкальской впадины рифтовые разломы и долины «уходят» от кратона внутрь Саяно-Байкальского подвижного пояса, то наследуя, то пересекая структуры фундамента. И только на крайнем северо-востоке, в бассейне р. Олекма, рифтовая система снова сближается с кратоном в области Алданского щита, пересекает его край и здесь же вырождается [22]. Центральная часть БРЗ располагается под озером Байкал. Здесь происходит расхождение земной коры. Существуют две гипотезы о причинах возникновения и развития БРЗ:

1. Рифтогенез БРЗ вызван влиянием субдукции Индостана на рифтогенез в Восточной Сибири.
2. Рифтогенез БРЗ вызван неким местным геодинамическим фактором — например, мантийным плюмом.

В работе [22] сделан обстоятельный анализ причин рифтогенеза БРЗ. В данной работе эти две гипотезы объединены и аргументированно показано, что причины кайнозойского рифтогенеза в Восточной Сибири следует искать не в противопоставлении местных и удаленных геодинамических механизмов, а в их взаимодействии. Развивая эту точку зрения

представляется целесообразным дать объективные, инструментально доказанные признаки плюма, который далее будем называть Байкальским.

Сейсмотомографией горячих полей мантии Земли установлено, что от слоя D'' до границы верхней—нижней мантии поднимаются суперплюмы, которые распадаются на серию малых плюмов, поднимаются через верхнюю мантию (через слой стагнированных литосферных плит), образуя большие магматические провинции (LIP) [4]. БРЗ находится на краю Центральнo-Азиатской области внутриплитового магматизма (ЦАВП) [6]. Логично предположить, что проявление вулканизма в БРЗ и одна из причин её рифтогенеза вызваны именно ответвлением малого плюма ЦАВП.

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. 250 млн лет назад Сибирские траппы образовались в результате непрерывного извержения Виллюйского 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 Йеллоустонского 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 выбросы поднялись на высоту до 50 км, вулканический пепел покрыл более четверти территории Северной Америки. Этот взрыв супервулкана превышает по мощности все взрывы вулканов в истории человечества.

Если магматический канал плюма по каким-либо причинам не успел глубоко внедриться в литосферу, то внешнего проявления магматизма может или не быть вообще, или вулканическая деятельность в этом районе крайне слаба. Примером такого взаимодействия плюма с литосферой являются, например, промежутки между вулканами Гавайского архипелага. То же самое, например, наблюдается и в Тункинской долине БРЗ, где слабая вулканическая деятельность в виде цепочки недавно потухших вулканов представлена в основном горячими минеральными источниками.

В поисках гипотетического места расположения эпицентра Байкальского плюма наибольший интерес представляет район Тункинской долины. Именно здесь представляется наиболее вероятным такое воздействие вертикального потока твёрдого вещества нижней мантии на литосферу, которое приводит к рифтогенезу БРЗ. Однако, несмотря на логичность такого предположения, объективных доказательств тому нет.

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 корот-

копериодных сейсмографов [2], поэтому в настоящее время Йеллоустонский плюм является наиболее изученным.

Несмотря на то, что в настоящее время вокруг Байкала размещено более 30 сейсмических станций, работы по сейсмотомографии Байкальского мантийного плюма пока ещё не дали точного ответа на вопрос: — существует ли Байкальский мантийный плюм или его нет. Это скорее всего объясняется следующими основными причинами:

1. Для сейсмотомографии малого плюма сейсмостанции должны быть расположены примерно по периметру его вертикального канала. При хаотичном расположении сейсмостанций по отношению к эпицентру малого плюма качественную сейсмотомографию, направленную на поиск конкретного малого плюма, выполнить невозможно. Сейсмотомографией выделена ЦАВП в целом, но нет достаточно четкой её конкретики.

2. Канал малого плюма имеет относительно небольшой диаметр, а потому не был обнаружен методом сейсмотомографии.

Таким образом, возникла проблема поиска новых научных методов и инструментов для изучения Байкальского мантийного плюма.

Спектральный метод исследования глубинной геодинамики и доказательство существования Байкальского плюма

Для поиска новых ещё неизвестных закономерностей тектонической деятельности в районе БРЗ был выполнен спектральный анализ скорости изменения парных индикаторных функций. 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; T_H - период наблюдения сигнала $x(t)$.

Исследования спектра показали, что все парные индикаторные функции имеют явно выраженный максимум колебаний с периодичностью примерно одна неделя. Это явление ранее было неизвестно и было названо нами в рабочем порядке «Пульс Земли» [19]. Как за весь период наблюдения, так и на отдельных рассмотренных участках (например, Култукское землетрясение) 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 изменение давления горных пород внутри тектонических плит в районе БРЗ. Выявленные колебания давления в земной коре невозможно объяснить взаимодействием Сибирского кратона и Центрально-Азиатского подвижного пояса, которое является очень медленным и односторонним и, поэтому, не может содержать столь высокочастотных (в геологическом масштабе времени) периодических составляющих. Эти колебания также невозможно объяснить какими-либо астрономическими явлениями, поскольку они не укладываются в целое количество суток, а потому не могут быть связаны с суточным вращением Земли.

Сопоставив спектральные характеристики парных индикаторных функций с гипотезой о существовании Байкальского плюма мы пришли к единственному разумному объяснению постоянных, не прекращающихся периодических колебаний давления в земной коре Южного Прибайкалья, заключающегося в том, что эти колебания вызваны динамикой действия Байкальского плюма, являющегося малым ответвлением ЦАВП. Исходя из сказанного спектральный анализ парных индикаторных функций и физическое обоснование полученных с его помощью результатов можно назвать спектральным методом исследования глубинной геодинамики. На основании спектрального метода исследования глубинной геодинамики можно предположить работу следующего геодинамического механизма БРЗ:

В районе Тункинской долины под литосферой имеется выход малого плюма. Вероятнее всего (в отличие, например, от Йеллоустоунского супервулкана) здесь нет магматического резервуара. Поэтому, когда под действием конвекции частично расплавленное вещество мантии поднимается по каналу плюма вертикально вверх, то оно упирается в нижний свод литосферы и не находит выхода. Из-за возникшей непроходимости, давление в канале ствола Байкальского плюма начинает повышаться. Повышение давления приподнимает литосферу в районе Тункинской долины и для магмы появляется выход в боковой канал. После того, как порция магмы проходит из плюма в боковой канал, давление в вертикальном канале плюма падает, литосфера опускается и её нижний свод вновь закрывает выход из вертикального канала плюма. Далее этот цикл повторяется с периодичностью примерно в одну неделю. По своей физике такой механизм глубинной геодинамики в районе БРЗ схож с работой грязевого вулкана или гейзера.

Вещество мантии, попавшее в боковой канал, образует подкорковый поток магмы, который начинается под Тункинской долиной и движется под оз. Байкал общим направлением на Восток. Логично предположить, что этот подкорковый поток магмы и является тем геодинамическим фактором, который ответственен за рифтообразование БРЗ.

В целом применение метода парных индикаторных функций для исследования Байкальского плюма открыло новую перспективную научную тематику в области геодинамики. Представляется актуальным, что для продолжения работ в этом направлении прежде всего было бы очень интересно провести подобные сравнительные исследования и в других горячих точках. Возможно, что при этом будут открыты новые геодинамические явления и закономерности, касающиеся не только БРЗ.

Заключение

По современным представлениям формирование Байкальской рифтовой зоны и её высокой сейсмичности обусловлено взаимодействием внешних (Гималайской коллизией) и местных (вторжение разогретого материала в холодную литосферу) глубинных геодинамических сил. Поскольку геодинамика Прибайкалья и сейсмическая активность этого региона неразрывно взаимосвязаны, постольку стало возможным использовать гидрогеохимические предвестники землетрясений на основе изменения концентрации растворенных радона и гелия в подземных водах не только для прогноза землетрясений, но и для исследования влияния глубинной геодинамики на литосферу в районе БРЗ. Для этого были разработаны модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры и математический аппарат парных индикаторных функций.

Реализованный на практике математический аппарат парных индикаторных функций показал, что он пригоден не только для достоверного среднесрочного прогноза землетрясений, но и для исследования процессов глубинной геодинамики. Применение этого метода позволило эффективно дополнить существующий метод сейсмотомографии и расширило наши знания о БРЗ. Главный практический результат его применения заключается в том, что с его помощью были впервые получены объективные доказательства существования Байкальского плюма.

Согласно выполненным исследованиям на территории Байкальского региона непрерывно действует знакопеременное вертикальное движение литосферы. Поэтому отдельный практический народнохозяйственный интерес представляют исследования влияния этих колебательных движений литосферы на безопасность использования масштабных строительных объектов транспортной инфраструктуры: мостов, насыпей, эстакад и т.п.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wilson J.T. A possible origin of the Hawaiian Islands // *Canad. J. Phys.*, 1963, v. 41, p. 863—866.
2. Nataf H.C. Seismic imaging of mantle plumes. *Annu. Rev // Earth Planet. Sci.*, 2000, v. 28, p. 391—417.

3. Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и строение (пер. с англ.). М., 1960, 485 с.
4. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Геология и геофизика, 2014, т. 55, № 2, с. 153—184.
5. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Внутриплитовый вулканизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли // Геотектоника, 1983, № 1, с. 28—45.
6. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Глубинная геодинамика, или как работает мантия Земли // Наука из первых рук, 2011, № 6(42), с. 19—35.
7. Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle // Earth Planet. Sci. Lett., 2003, v. 205, p. 295—308.
8. Burke K., Torsvik T.H. Derivation of large igneous provinces of the past 200 million years from long-term heterogeneities in the deep mantle // Earth Planet. Sci. Lett., 2004, v. 227, p. 531—538.
9. Божко Н.А. Суперконтинентальная цикличность в истории Земли // Вестник Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология, 2009, №2, с. 13-27.
10. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Тектоника плит и мантийные плюмы — основа эндогенной тектонической активности земли последние 2 млрд. лет // Геология и геофизика, 2016, т. 57, № 1, с. 11—30.
11. Clague D.A., Dalrymple G.B. Geologic evolution: The Hawaiian-Emperor volcanoc chain // Volcanism in Hawaii. Washington: Governmental printong office, 1987, p. 5-54.
12. Пучков В.И. «Великая дискуссия» о плюмах: так кто же всё-таки прав? // Геотектоника, № 1, 2009, с. 3-22.
13. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A., Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // Earth Science Rev., 2010, v. 102, № 1—2, p. 29—59.
14. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 313 с.
15. Scholz C.H., Sykes L.K., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis // Science, 1973, v. 181, p. 803-810.
16. Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. Модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры // Геодинамика и тектонофизика, 2018, т. 9, № 1, с. 165—175.
17. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: Учебник для вузов, 4-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1984, 369 с.
18. Горная энциклопедия. <http://www.mining-enc.ru/p/prochnost>.
19. Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. Гидрогеохимический предвестник землетрясений в Южном Прибайкалье // Геология и геофизика, 2017, № 5, с. 18-28.
20. Кашковский В.В., Семёнов Р.М., Лопатин М.Н. Применение системного подхода для разработки методов прогноза землетрясений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2017, вып. № 2(54), с. 95-103.
21. Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А. О возможности оценок косейсмической деформации по данным равномерных наблюдений в скважине // Физика Земли, 2010, № 1, с. 51-61.
23. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика, 2003, т. 44, № 5, с. 391-406.

REFERENCES

1. Wilson J.T. A possible origin of the Hawaiian Islands // Canad. J. Phys., 1963, v. 41, p. 863—866.
2. Nataf H.C. Seismic imaging of mantle plumes. Annu. Rev // Earth Planet. Sci., 2000, v. 28, p. 391—417.

3. Jeffries G. The Earth, its origin, history and structure (translated from English). M., 1960, 485 p.
4. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Mantle plumes of Northeast Asia and their role in the formation of endogenous deposits // *Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, No. 2, pp. 153-184.
5. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I. Intraplate volcanism and its significance for understanding processes in the Earth's mantle // *Geotectonics*, 1983, No. 1, pp. 28-45.
6. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Deep Geodynamics, or how the Earth's mantle works // *Science from the first hands*, 2011, No. 6(42), pp. 19-35.
7. Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, v. 205, p. 295—308.
8. Burke K., Torsvik T.H. Derivation of large igneous provinces of the past 200 million years from long-term heterogeneities in the deep mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, v. 227, p. 531—538.
9. Bozhko N.A. Supercontinental cyclicity in the history of the Earth // *Vestnik Mosk. Univ. Ser. 4. Geology*, 2009, No. 2, pp. 13-27.
10. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Plate tectonics and mantle plumes — the basis of endogenous tectonic activity of the Earth for the last 2 billion years. years // *Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, No. 1, pp. 11-30.
11. Clague D.A., Dalrymple G.B. Geologic evolution: The Hawaiian-Emperor volcanoc chain // *Volcanism in Hawaii*. Washington: Governmental printong office, 1987, p. 5-54.
12. Puchkov V.I. "The Great discussion" about plumes: so who is right after all? // *Geotectonics*, No. 1, 2009, pp. 3-22.
13. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A., Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // *Earth Science Rev.*, 2010, v. 102, № 1—2, p. 29—59.
14. Sobolev G.A. Fundamentals of earthquake prediction. M., Nauka, 1993, 313 p.
15. Scholz C.H., Sykes L.K., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis // *Science*, 1973, v. 181, p. 803-810.
16. Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. Модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры // *Геодинамика и тектонофизика*, 2018, т. 9, № 1, с. 165—175.
17. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: Учебник для вузов, 4-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1984, 369 с.
18. Горная энциклопедия. <http://www.mining-enc.ru/p/prochnost>.
19. Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. Гидрогеохимический предвестник землетрясений в Южном Прибайкалье // *Геология и геофизика*, 2017, № 5, с. 18-28.
20. Кашковский В.В., Семёнов Р.М., Лопатин М.Н. Применение системного подхода для разработки методов прогноза землетрясений // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2017, вып. № 2(54), с. 95-103.
21. Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А. О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений в скважине // *Физика Земли*, 2010, № 1, с. 51-61.
23. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // *Геология и геофизика*, 2003, т. 44, № 5, с. 391-406.

Информация об авторах

Кашковский Виктор Владимирович - д.т.н., профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

Емельянова Кристина Артемовна - магистрант ПИМ.1-22-1, кафедра «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Emailkristina_1516@mail.ru.

Information about the authors

Kashkovsky Viktor Vladimirovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Information Systems and Information Protection», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

Emelyanova Kristina Artemovna - Master's student PIm.1-22-1, Department of «Information Systems and Information Protection», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Emailkristina_1516@mail.ru