

**В.В. Кашковский, К.А. Емельянова**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск Россия*

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОДИНАМИКИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ**

**Аннотация.** Так как в Иркутской области весьма развиты транспортная и хозяйственная отрасли, одним из важнейших аспектов их развития и эксплуатации является сейсмическое районирование транспортной инфраструктуры и учёт рисков от последствия землетрясений на территории Прибайкалья. Для решения подобных задач, начиная с 2012 года, Иркутский государственный университет путей сообщения и Институт земной коры СО РАН проводят исследования, направленные на поиск методов прогнозирования сейсмической активности и исследования геодинамики Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). В результате выполненных исследований был разработан метод среднесрочного прогнозирования сейсмической активности, основанный на обработке статистических данных о содержании гелия в подземных водах. Предложенный метод показал свою высокую эффективность при отсутствии пропусков событий сейсмической активности и ложных срабатываний.

Существует предположение, что одной из причин сейсмической активности Прибайкалья является влияние Байкальского мантийного плюма. Однако до сих пор само существование Байкальского мантийного плюма не доказано инструментально по причине высокой затратности необходимых для этого исследований. Практическое применение предложенного авторами метода среднесрочного прогнозирования сейсмической активности показало, что его можно использовать и для исследования глубинной геодинамики. Методом исследования геодинамики является спектральный анализ напряжения земной коры. Полученные результаты можно рассматривать как доказательство существования Байкальского плюма.

Для прогноза землетрясений и исследования геодинамики возникла необходимость в разработке специального программного обеспечения для обработки статистических данных по содержанию гелия в подземных водах. Разработке этого программного обеспечения и посвящена данная статья.

**Ключевые слова:** Байкальская рифтовая зона, прогноз землетрясений, спектральный анализ, геодинамика, мантийные плюмы, разработка программного обеспечения.

**V.V. Kashkovsky, K.A. Emelyanova**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

## **DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR STUDYING THE GEODYNAMICS OF THE BAIKAL RIFT ZONE**

**Annotation.** Since the Irkutsk region has a very developed transport and economic industries, one of the most important aspects of their development and operation is the seismic zoning of transport infrastructure and taking into account the risks from the effects of earthquakes in the territory of the Baikal region. To solve such problems, starting in 2012, Irkutsk State University of Communications and the Institute of the Earth's Crust SB RAS have been conducting research aimed at finding methods for predicting seismic activity and studying geodynamics of the Baikal Rift Zone (BRZ). As a result of the research carried out, a method of medium-term forecasting of seismic activity was developed, based on the processing of statistical data on the helium content in groundwater. The proposed method has shown its high efficiency in the absence of missing events of seismic activity and false positives.

There is an assumption that one of the reasons for the seismic activity of the Baikal region is the influence of the Baikal mantle plume. However, until now, the very existence of the Baikal mantle plume has not been proved instrumentally due to the high cost of the necessary research. The practical application of the method of medium-term forecasting of seismic activity proposed by the authors has shown that it can also be used for the study of deep geodynamics. The method of geodynamics is the spectral analysis of the stress of the Earth's crust. The results obtained can be considered as proof of the existence of the Baikal plume.

In order to predict earthquakes and study geodynamics, it became necessary to develop special software for processing statistical data on the helium content in groundwater. This article is devoted to the development of this software.

**Keywords:** Baikal rift zone, earthquake prediction, spectral analysis, geodynamics, mantle plumes, software development.

## Введение

Мантийный плюм – это поток горячего материала,двигающийся сквозь мантию Земли и поднимающийся из ее недр. Их считают ответственными за возникновение горячих точек, внутриконтинентальных рифов и траппов [1, 2, 3, 4, 5]. Так, например, Сибирские траппы, располагающиеся на Восточно – Сибирской платформе, признаны одними из самых крупных в мире. Грандиозная вспышка вулканической активности в конце перми — начале триаса на территории нынешней Сибири считается главной причиной крупнейшего вымирания, радикально изменившего структуру земной биосферы [6]. В качестве другого примера можно привести вертикальный разрез Кольской провинции по её состоянию на 385-368 млн. лет назад [7] (рис. 1)

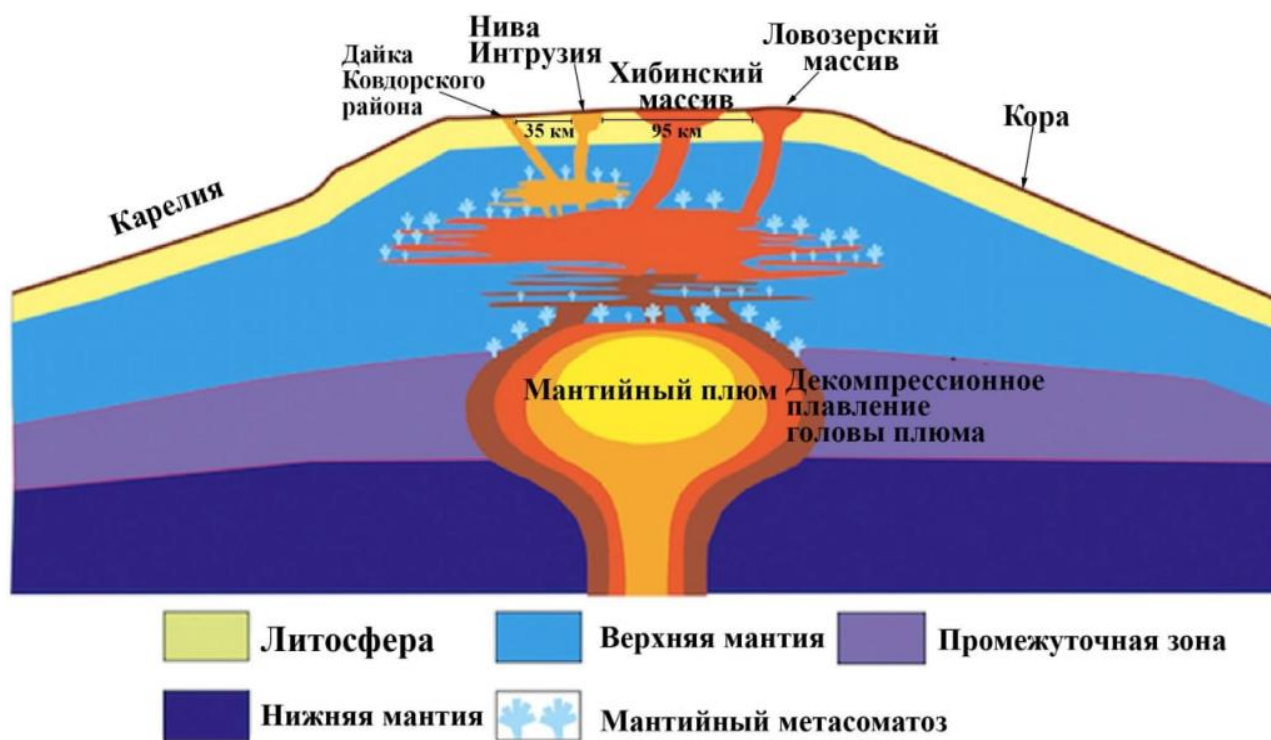


Рис. 1. Вертикальный разрез Кольской провинции (385-368 млн. лет назад).

Формирование структуры и магматизма Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) в течение последних 500 млн. лет было связано с процессами взаимодействия континентальной литосферы пояса с мантийными плюмами Северо-Азиатского горячего поля мантии. Оно началось около 500 млн. лет назад с момента столкновения литосферных комплексов Палеоазиатского океана с системой океанических островов, отвечавших этому горячему полю. В результате столкновения возникший аккреционный супертеррейн (каледониды ЦАСП) перекрыл горячую точку мантии, которая на протяжении раннего и среднего палеозоя (500-350 млн. лет) контролировала внутриплитную магматическую активность в Алтае-Саянской области ЦАСП. В начале позднего палеозоя ЦАСП, развиваясь в режиме активной окраины Сибирского континента, перекрыл два других мантийных плюма Северо-Азиатского горячего поля мантии. В структурах континентальной литосферы эти горячие точки проявлялись между 330 и 190 млн. лет и сформировали ряд зонально построенных магматических ареалов с батолитовыми ядрами и зонами рифтогенеза по периферии. В позднем мезозое и кайнозое (последние 170 млн. лет) внутриплитная магматическая активность в пределах ЦАСП контролировалась группой относительно мелких мантийных плюмов (hot-finger). [8]

Выполненные на основе палеогеографических данных реконструкции позволяют сопоставить Северо-Азиатское горячее поле мантии с современным Африкано-Атлантическим

горячим суперплюмом. Взаимодействие с ним литосферы Северо-Азиатского континента (включая ЦАСП) продолжалось с раннего палеозоя до позднего мезозоя. В начале позднего мезозоя после распада Пангеи континент был перемещен к востоку в область "холодного" суперплюма, формировавшегося у западного края Тихого океана. Предполагается, что в это перемещение был вовлечён литосферно-верхнемантийный пакет, включавший верхнемантийные плюмы, что обеспечило преобладание в составе внутриплитного магматизма раннего и позднего мезозоя/ [8]

В настоящее время Южно – азиатский мантийный плюм распадается на множество ветвей, одна из которых, предположительно, находится под Байкалом. Она выходит в Тункинской долине в виде горячих источников и следов вулканической деятельности, проявившейся примерно 8000 лет назад [5]. Этот район также выделяется высокой сейсмической активностью. Именно поэтому, с точки зрения определения сейсмичного районирования, а также развития хозяйственной и транспортной отраслей, важно достоверно знать, существует Байкальский плюм или нет [9, 10, 11].

Обычно, для поиска плюма, принято окружать область исследования сейсмостанциями. Когда на другой стороне Земли происходит землетрясение, они обрабатывают данные, полученные при распределении его волны внутри и вокруг плюма, в результате чего получается вертикальная картинка (см. рис.1).

Однако в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) такой системы нет, поэтому привычными средствами найти плюм не представляется возможным [5]. Исходя из этого возникает задача поиска более доступных инструментов для исследования глубинной геодинамики.

Ранее ИрГУПС'ом и Институтом земной коры СО РАН были выполнены исследования, направленные на поиск перспективных методик прогнозирования землетрясений. В результате этих исследований была представлена модель подготовки и реализации очага землетрясения, а на её основе была разработана гидрогеохимическая методика прогнозирования землетрясений [12, 13, 14]. В дальнейшем оказалось, что эту методику также можно использовать и для исследования глубинной геодинамики.

### **Разработка методики среднесрочного прогноза землетрясений**

После Ашхабадского землетрясения 1948 года было установлено, что изменение содержания гелия в подземных водах является предвестником землетрясения. Однако за прошедшее время так и не было создано достоверных методик гидрогеохимического прогнозирования землетрясений [15]. Все предложенные ранее методики имеют общий недостаток, связанный с тем, что на выход гелия влияют не только подвижки литосферы перед землетрясением, но и множество случайных факторов, вызывающих ложные прогнозы.

Главной причиной ложного срабатывания предложенных ранее методик гидрогеохимического прогноза землетрясений является то, что общепринятые модели подготовки и реализации землетрясения (например, [16, 17]) не учитывают затраты энергии, потраченные на вязкое растяжение горных пород, при подготовке землетрясения [12, 13, 14].

На рис.2 на примере растяжения металлического стержня до разрыва показана предложенная модель подготовки и реализации землетрясения, учитывающая физику разрушения горных пород (например, [18]).

Отрезок от точки О до В на рис. 2 характеризуется упругим растяжением горных пород

$$\Delta I_{упр} = \Delta I_{полн} - \Delta I_{ост},$$

которое впоследствии определит магнитуду землетрясения.

Следует отметить, что уже на участке от «С» до «В» на упругое растяжение будет накладываться и пластическая (вязкая) деформация горных пород, которая делает нелинейным график растяжения.

На участке от «В» до «Е» вся энергия движения литосферы уходит только на пластическую деформацию горных пород. В целом пластическая деформация горных пород на участке от «С» до «Е» характеризуется остаточным растяжением  $\Delta I_{ост}$ .

В точке растяжения «Е» при критическом давлении горных пород  $P_k$  наступает предел их текучести, возникает магистральный разрыв, и в форме землетрясения выделяется энергия сейсмических волн

$$E = SP_k \Delta l_{упр},$$

где  $S$  - это площадь горных пород вдоль магистрального разрыва.

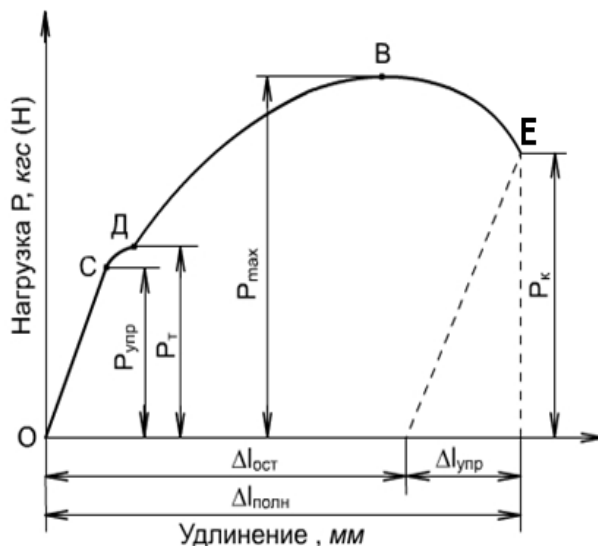


Рис. 2. Модель изменения силы растяжения металлического стержня при его испытании на разрыв.

Энергия, затраченная на растяжение горных пород на величину  $\Delta l_{ост}$ , приводит к появлению всех видов предвестников землетрясения. При этом, на основе физики разрушения горных пород (например, [19]) можно утверждать, что на предвестники землетрясения расходуется практически столько же энергии, сколько и на само землетрясение.

На примере анализа предвестников землетрясений сейсмически активного Байкальского региона нами было установлено, что этап подготовки крупных землетрясений В-Е занимает во времени порядка 1-2 месяца. При этом, чем больше магнитуда будущего землетрясения, тем продолжительнее во времени этап В-Е.

Важным выводом из анализа представленной модели является то, что на этапе подготовки землетрясения В-Е происходит постепенное снижение давления в горных породах, сопровождающееся интенсивным выбросом гелия. Это и является достоверным среднесрочным признаком будущего землетрясения.

Главным количественным отличием результатов подготовки землетрясения по предложенной модели является то, что признаки падения давления от  $P_{max}$  до  $P_k$  могут быть выявлены на гораздо большем расстоянии от эпицентра будущего землетрясения, чем, например, у предвестников землетрясения согласно моделей [16, 17].

Предсказанная способность изменения интенсивности выделения гелия на больших расстояниях от будущего эпицентра землетрясения, позволила разработать надёжную методику среднесрочного прогноза землетрясения. В основе методики лежит корреляционный анализ ежесуточного выхода гелия на удалённых скважинах. Все случайные факторы действуют на удалённые скважины по-разному, и только изменение давления горных пород перед землетрясением одновременно на все. Таким образом, корреляционный анализ позволяет исключить из анализа случайные факторы.

В Иркутском регионе имеются три скважины для забора подземных вод и измерения в них уровня гелия. Первая точка – это г. Иркутск, скважина К-ГИС, вторая точка – это Зеленый Мыс, а третья – это водозабор в районе п. Листвянка. Точки измерения вытянуты примерно в одну линию, протяжённостью 65 км. Для выделения предвестника землетрясений

нами предложен механизм парных индикаторных функций:  $I_{Л-З}$  между Листвянкой и Зелёным Мысом,  $I_{Л-К}$  между Листвянкой и К-ГИС,  $I_{З-К}$  между Зелёным Мысом и К-ГИС. Каждая парная индикаторная функция вычисляет текущие значения коэффициента корреляции с окном в 10 дней, установленным опытным путём [12, 13, 14]:

$$I_{Л-З}(t_i) = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{H_{Л}} \tilde{\sigma}_{H_{З}}} \sum_{j=-10}^0 (H_{Лi-j} - \tilde{m}_{Л})(H_{Зi-j} - \tilde{m}_{З});$$

$$I_{Л-К}(t_i) = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{H_{Л}} \tilde{\sigma}_{H_{К}}} \sum_{j=-10}^0 (H_{Лi-j} - \tilde{m}_{Л})(H_{Ки-j} - \tilde{m}_{К});$$

$$I_{З-К}(t_i) = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{H_{З}} \tilde{\sigma}_{H_{К}}} \sum_{j=-10}^0 (H_{Зi-j} - \tilde{m}_{З})(H_{Ки-j} - \tilde{m}_{К}),$$

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

- СКО измерений концентрации гелия в Листвянке, на Зеленом Мысе и К-ГИС за всё время наблюдения, соответственно;

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

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

В качестве примера прогноза землетрясения на рис. 3 показан образ парных индикаторных функций перед Култукским землетрясением 2008 года. На графике можно увидеть, что на отметке 533 началось повышение всех индикаторных функций и, достигнув пика, показатели начали снижаться, после чего, через 2 недели, в отметке 605 произошло сильное землетрясение.

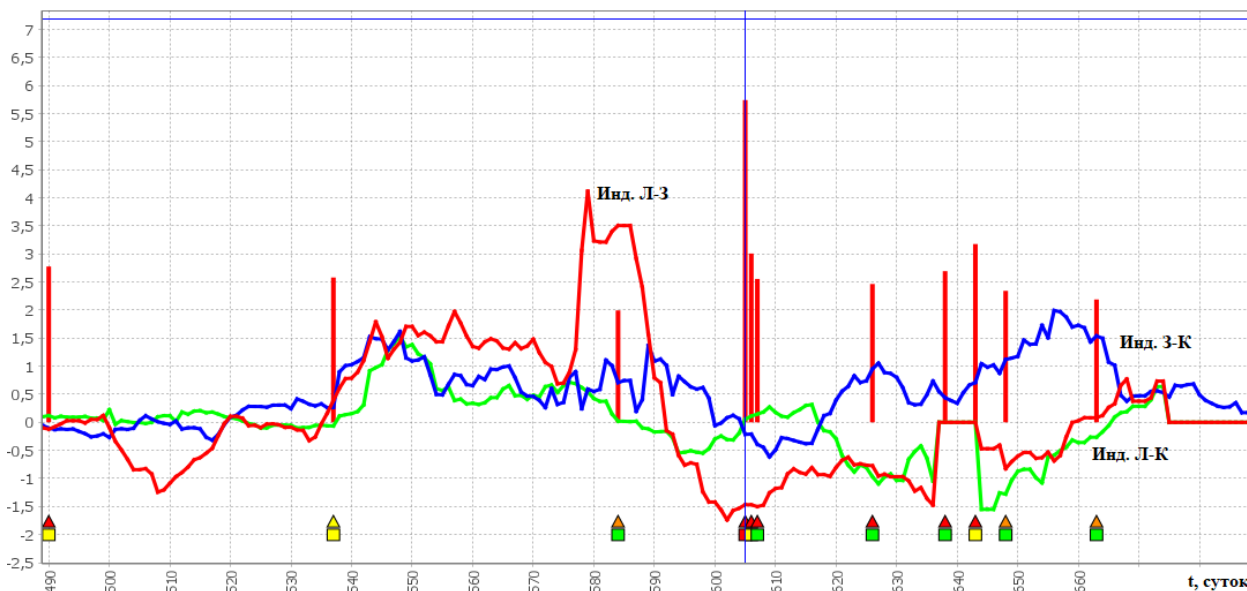


Рис. 3. Информационная структура (образ) парных индикаторных функций в ходе подготовки и реализации Култукского землетрясения 27.08.2008 г.

### Разработка спектрального метода для исследования геодинамики Байкальской рифтовой зоны

В ходе дальнейших исследований было обнаружено, что индикаторные функции могут использоваться и в исследовании глубинной геодинамики, если применить к ним спектраль-

ный анализ. Для этого применяется функция текущего энергетического спектра различных наблюдаемых переменных:

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

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

На рис. 4 приведены спектры парных индикаторных функций, полученных за весь период наблюдения. Как видно из рисунка, все парные индикаторные функции имеют явно выраженный максимум колебаний с периодичностью примерно одна неделя. В начале исследований это явление было названо нами «Пульс Земли».

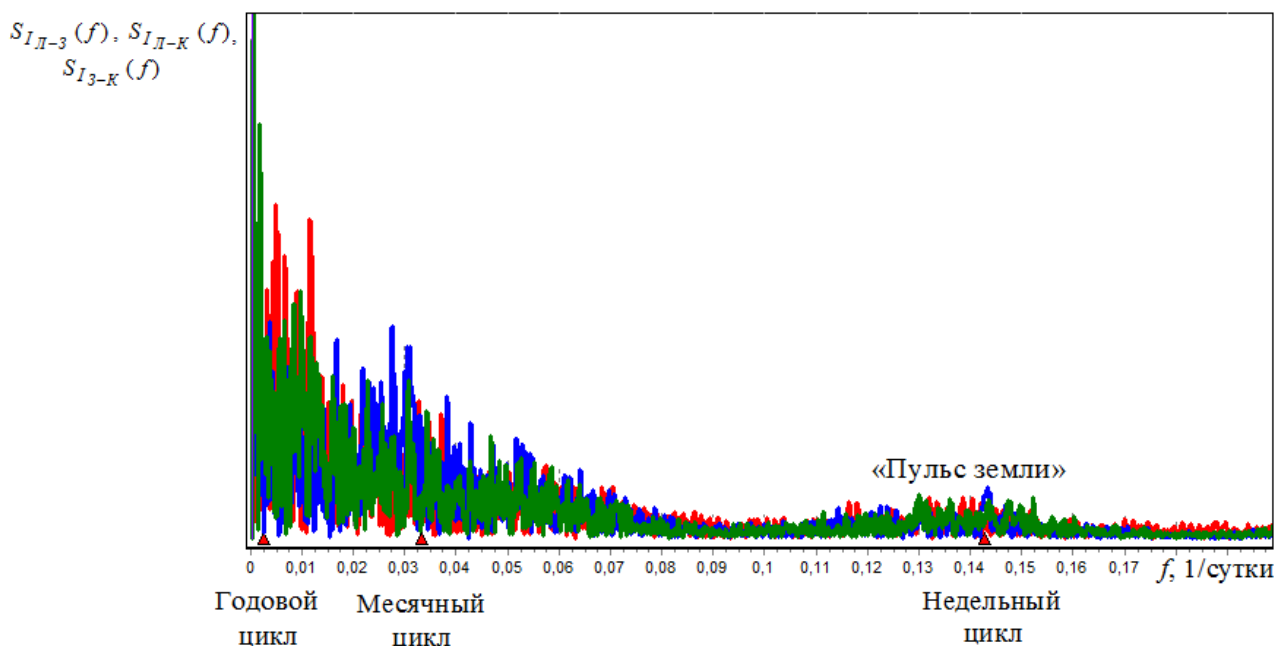


Рис. 4. Текущие энергетические спектры парных индикаторных функций.

Нами было установлено, что данные колебания не зависят от метео, сейсмо или астрофизических факторов и событий, они строго периодичны и постоянны. Поэтому было выдвинуто предположение, что единственным источником такого изменения давления в горных породах может являться выход мантийного плюма. Существует гипотеза, что вещество мантии выходит под Тункинской долиной, а затем движется на восток под Байкалом. Это является одной из причин его постепенного расширения. Нами было предположено, что это явление носит периодический характер. В начале очередного цикла, давление внутри плюма постепенно нарастает, земная кора над выходом плюма приподнимается, и магма перетекает в русло под Байкалом. После этого давление на выходе плюма падает, земная кора над ним опускается и цикл повторяется.

#### Разработанное программное обеспечение

Разработанные методики требуют объёмных вычислений, которые невозможно выполнить вручную. Поэтому для их практической реализации потребовалась разработка специального программного обеспечения (СПО).

Главной задачей СПО является построение графиков парных индикаторных функций с привязкой их к базе данных сейсмических событий (рис. 5). Пользователь программы может перемещаться влево или вправо вдоль графика и изменять его масштаб. Под графиком прямоугольниками и треугольниками отображается события землетрясений.

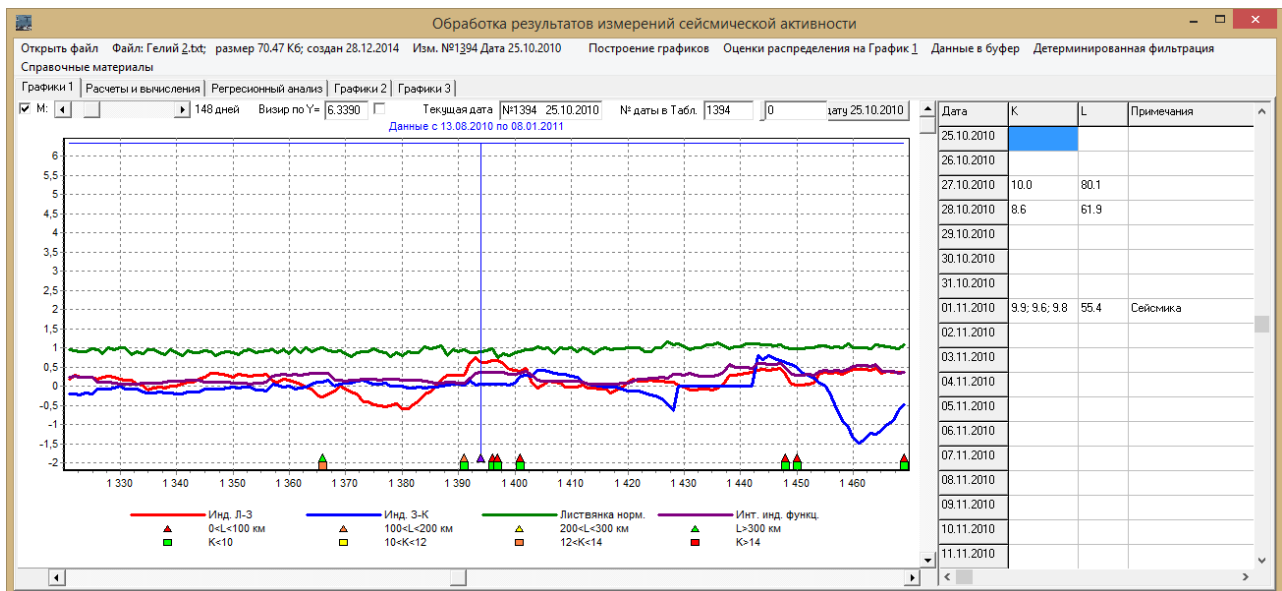


Рис. 5. Закладка блокнота программы с графиком парных индикаторных функций и их привязка к базе данных сейсмических событий.

Цвет треугольника показывает удаление от эпицентра землетрясения до средней точки наблюдения (Зелёного мыса).

Цвет прямоугольника показывает энергетический класс  $K$  землетрясения.

Энергетический класс  $K$  также, как и магнитуда  $M$ , характеризует очаг землетрясения. Это характеристика прямо связана с энергией высвободившихся при землетрясении сейсмических волн.

Для пересчёта магнитуд  $M$  в значения энергетических классов  $K$  используется выражение:

$$K = 4 + 1,8M .$$

В свою очередь энергетический класс  $K$  связан с сейсмической энергией  $E$  простым соотношением:

$$E = 10K .$$

Следовательно, магнитуду  $M$  можно связать с сейсмической энергией  $E$  следующим образом:

$$LgE = 4 + 1,8M .$$

Энергетический класс был введён в практику сейсмологических наблюдений советским сейсмологом Татьяной Глебовной Раутиан в 1964 году.

Детали сейсмических событий отображаются в таблице сейсмических событий, автоматически привязанной к графикам парных индикаторных функций. Перемещение по графикам сопровождается автоматическим, синхронным перемещением по таблице сейсмических событий. Данная таблица находится справа от графиков парных индикаторных функций.

Для вычисления спектров парных индикаторных функций служит соответствующая закладка на блокноте головной формы программы (рис. 6).

Помимо основных функций, СПО обладает рядом вспомогательных расчётных функций и содержит множество справочных материалов. В качестве примера на рис. 7 показана форма, отображающая карту Иркутской области. Масштаб карты можно произвольно изменять. На карте можно вычислять расстояния между произвольно выбранными точками, определять их координаты и азимуты.



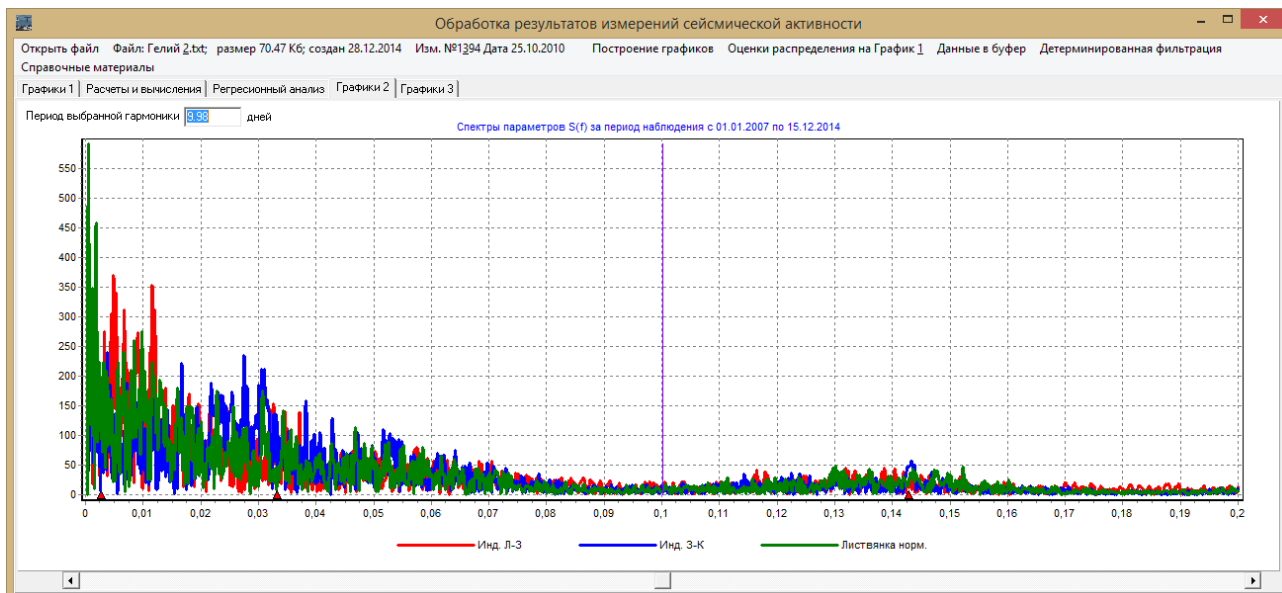


Рис. 6. Закладка блокнота программы для вычисления спектров индикаторных функций

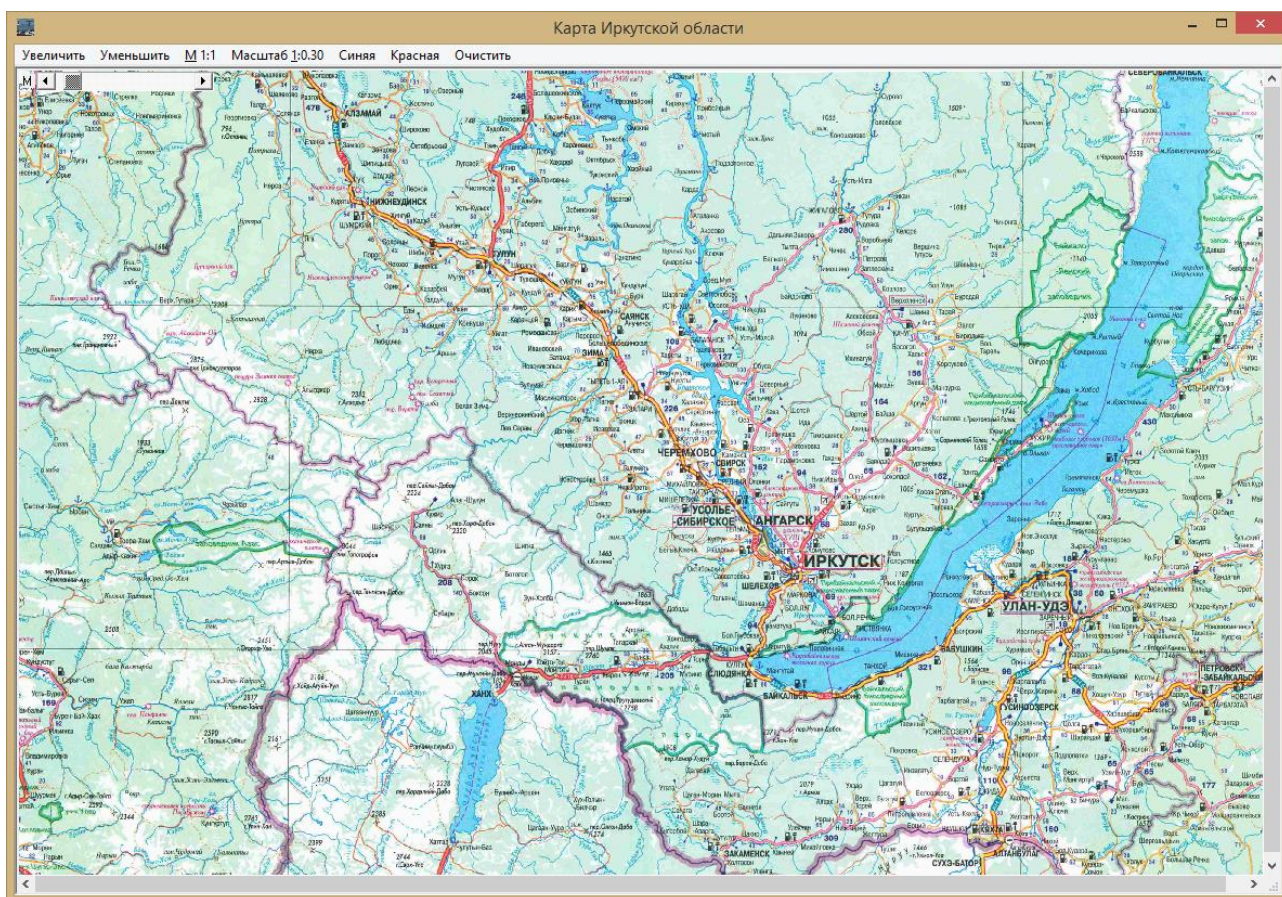


Рис. 7. Карта Иркутской области с возможностью изменения масштаба и измерения расстояний.

### Заключение

В результате моделирования процесса подготовки и реализации землетрясения был разработан перспективный инструмент для прогнозирования землетрясений в БРЗ и изучения физических свойств глубинной геодинамики. На практике предложенная методика гидрогеохимического прогнозирования землетрясений продемонстрировала высокую надёжность, так как за весь период исследований не было выявлено ни единого случая ложной тревоги или пропуска события. Результаты практического применения спектрального метода могут рассматриваться в качестве достоверного доказательства существования Байкальского



плюма, чего не удавалось подтвердить ранее. При этом основным достоинством предложенного способа анализа геодинамики является низкая ресурсозатратность, в сравнении с другими инструментами. В целом выполненное исследование позволяет оказать значительное влияние на дальнейшее развитие знаний о геодинамике. Для практической реализации представленных алгоритмов было разработано СПО, реализующее как методику гидрогеохимического прогнозирования землетрясений, так и спектральный метод исследования глубинной геодинамики БРЗ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nataf H.C. Seismic imaging of mantle plumes. *Annu. Rev // Earth Planet. Sci.*, 2000, v. 28, p. 391-417.
2. Clague D.A., Dalrymple G.B. Geologic evolution: The Hawaiian-Emperor volcanoc chain // *Volcanism in Ha-waii*. Washington: Governmental printong office, 1987, p. 5-54.
3. Wilson J.T. A possible origin of the Hawaiian Islands // *Canad. J. Phys.*, 1963, v. 41, p. 863-866.
4. 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.
5. 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.
6. Марков А. Формирование сибирских траппов сопровождалось горением большого количества каменного угля // Некоммерческий научно-популярный проект «Элементы большой науки», *Новости науки*. URL: [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/433670/Formirovanie\\_sibirskikh\\_trappov\\_soprovozhdalos\\_goren\\_iem\\_bolshogo\\_kolichestva\\_kamennogo\\_uglya](https://elementy.ru/novosti_nauki/433670/Formirovanie_sibirskikh_trappov_soprovozhdalos_goren_iem_bolshogo_kolichestva_kamennogo_uglya).
7. Арзамасцев А. А. и др. Палеозойский толеитовый магматизм в Кольской провинции: ареал распространения, возраст, связь со щелочным магматизмом/ А. А. Арзамасцев, Р. В. Веселовский, А. В. Травин, Д. С. Юдин, Б. В. Беляцкий // *Петрология*, 2017, том 25, № 1, с. 46-70.
8. DEEP GEODYNAMICS AND MANTLE PLUMES: THEIR ROLE IN THE FORMATION OF THE CENTRAL ASIAN FOLD BELT. Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I. *Petrology*. 2003. Т. 11. № 6. p. 504-531.
9. 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.
10. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Глубинная геодинамика, или как работает мантия Земли // *Наука из первых рук*, 2011, № 6(42), с. 19-35.
11. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // *Геология и геофизика*, 2003, т. 44, № 5, с. 391-406.
12. 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.
13. Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. Гидрогеохимический предвестник землетрясений в Южном Прибайкалье // *Геология и геофизика*, 2017, № 5, с. 18-28.
14. 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.
15. Саньков В.А., Леви К.Г., Кале Э., Девершер Ж., Лесне О., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Буддо В.Ю., Залуцкий В.Т., Башкуев Ю.Б. Современные и голоценовые горизонтальные движения на Байкальском геодинамическом полигоне // *Геология и геофизика*, 1999, т. 40, № 3, с. 422-430.
16. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 313 с.

17. Scholz C.H., Sykes L.K., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis // *Science*, 1973, v. 181, p. 803-810.
18. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: Учебник для вузов, 4-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1984, 369 с.
19. Горная энциклопедия. URL: <http://www.mining-enc.ru/p/prochnost>, 2023.

## REFERENCES

1. Nataf H.C. Seismic imaging of mantle plumes. *Annu. Rev // Earth Planet. Sc.*, 2000, v. 28, p. 391-417.
2. Clague D.A., Dalrymple G.B. Geologic evolution: The Hawaiian-Emperor volcanoc chain // *Volcanism in Ha-waii*. Washington: Governmental printong office, 1987, p. 5-54.
3. Wilson J.T. A possible origin of the Hawaiian Islands // *Canada. J. Phys.*, 1963, v. 41, p. 863-866.
4. 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.
5. 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.
6. Markov A. The formation of Siberian traps was accompanied by the gorenje a large amount of coal // Non-commercial popular science project "Elements of big science", *Science News*. URL: [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/433670/Formirovanie\\_sibirskikh\\_trappov\\_soprovozhdalos\\_gorenjiem\\_bolshogo\\_kolichestva\\_kamennogo\\_uglya](https://elementy.ru/novosti_nauki/433670/Formirovanie_sibirskikh_trappov_soprovozhdalos_gorenjiem_bolshogo_kolichestva_kamennogo_uglya)
7. Arzamashev A. A. et al. Paleozoic tholeiitic magmatism in the Kola Province: distribution area, age, relationship with alkaline magmatism/ A. A. Arzamashev, R. V. Veselovsky, A.V. Travin, D. S. Yudin, B. V. Byalyatsky // *Petrology*, 2017, volume 25, No. 1, pp. 46-70
8. DEEP GEODYNAMICS AND MANTLE PLUMES: THEIR ROLE IN THE FORMATION OF THE CENTRAL ASIAN FOLD BELT. Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I. *Petrology*. 2003. T. 11. № 6. p. 504-531.
9. 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, pp. 29-59.
10. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Deep geodynamics, or how the Earth's mantle works // *Science at first hand*, 2011, No. 6(42), pp. 19-35.
11. Logachev N.A. History and geodynamics of the Baikal Rift // *Geology and Geophysics*, 2003, vol. 44, No. 5, pp. 391-406.
12. Kashkovsky V.V., Semenov R.M., Lopatin M.N. Application of a systematic approach for the development of earthquake prediction methods // *Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2017, issue No. 2(54), pp. 95-103.
13. Semenov R.M., Kashkovsky V.V., Lopatin M.N. Hydrogeochemical harbinger of earthquakes in the Southern Baikal region // *Geology and Geophysics*, 2017, No. 5, pp. 18-28.
14. Semenov R.M., Kashkovsky V.V., Lopatin M.N. Model of preparation and implementation of tectonic earthquake and its precursors in conditions of stretching of the Earth's crust // *Geodynamics and tectonophysics*, 2018, vol. 9, No. 1, pp. 165-175.
15. Sankov V.A., Levi K.G., Kale E., Deversher J., Lesne O., Likhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Buddo V.Yu., Zalutsky V.T., Bashkuev Yu.B. Modern and Holocene horizontal movements at the Baikal geodynamic polygon // *Geology and Geophysics*, 1999, vol. 40, No. 3, pp. 422-430.
16. Sobolev G.A. Fundamentals of earthquake prediction. М., Nauka, 1993, 313 p.
17. Scholz C.H., Sykes L.K., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis // *Science*, 1973, v. 181, pp. 803-810.
18. Rzhnevsky V.V., Novik G.Ya. Fundamentals of rock physics: Textbook for universities, 4th ed., reprint. and additional М., Nedra, 1984, 369 p.
19. Mountain Encyclopedia. URL: <http://www.mining-enc.ru/p/prochnost>, 2023.

### **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](mailto: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: [kristina\\_1516@mail.ru](mailto:kristina_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](mailto: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: [kristina\\_1516@mail.ru](mailto:kristina_1516@mail.ru)