

УДК 519.254; 004.942; 550.34.06.013.3.

## Корреляционный анализ пространственных аномалий вычисленных и измеренных полей в системе GIS-ENDDB

© 2020 г. А.В. Михеева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; <sup>2</sup>ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

**Аннотация.** В экспертно-информационную систему GIS-ENDDB включены глобальные каталоги сейсмичности и данные измерений различных геофизических полей. Статистическая обработка этих данных и визуализация распределения характеристик сейсмогеодинамического процесса в виде изолиний позволяют выявить пространственную взаимосвязь распределения сейсмичности с аномалиями геофизических полей. Первые попытки выявления этой взаимосвязи были сделаны в соавторстве с Л.С. Соколовой в 2016 г. на основе визуального сравнения карт, полученных в результате применения различных методов анализа данных (в частности, карт изолиний максимальной зафиксированной магнитуды землетрясений  $M_{\max}$ ) для разных выборок сейсмологических каталогов – с одной стороны, и различных модификаций измеренного геофизического поля (в данном случае, регионального поля теплового потока (ТП)) – с другой. Эти результаты носили скорее качественный характер, но впоследствии для количественного сравнения полей была реализована функция корреляционного анализа. Корреляционный анализ осуществляется по гистограмме распределения числа ячеек (узлов)  $N_y$  от разности  $\Delta F$  приведённых значений полей  $F_1$  и  $F_2$  (относительно среднего арифметического  $F_{i, \text{ср}}$ ) в ячейках, равновеликих для сравниваемых полей. Для выявления неслучайных вариаций гистограммы  $N_y(\Delta F)$  даются на фоне кривой нормального распределения, что позволяет не только визуально (по отклонению первых столбцов от нормы), но и количественно установить степень корреляции. Для исследованных территорий получены гистограммы, которые показывают: 1 – умеренную корреляцию полей ТП и  $M_{\max}$  в области Северо-Американского континента (каталог NEIC,  $M \geq 5$ , ячейка  $3 \times 4^\circ$ ); 2 – отсутствие корреляции по всему Азиатско-Дальневосточному региону (COMPLEX,  $M \geq 4$ ,  $H \geq 50$  км, ячейка  $6 \times 8^\circ$ ); 3 – высокую корреляцию в прямоугольной области, охватывающей Внутри-Азиатский горный пояс ( $30\text{--}40^\circ\text{N}$ ;  $66\text{--}84^\circ\text{E}$ , COMPLEX,  $M \geq 5$ ,  $H \geq 50$  км, ячейка  $1 \times 1^\circ$ ).

**Ключевые слова:** корреляционный анализ, каталоги и базы данных, землетрясение, сейсмогеодинамический процесс, геофизические поля.

**Для цитирования:** Михеева А.В. Корреляционный анализ пространственных аномалий вычисленных и измеренных полей в системе GIS-ENDDB // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 103–112. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.10>

### Введение

Разрабатываемая автором экспертно-информационная система GIS-ENDDB (Earth's Natural Disasters DataBase) [Михеева, Дядьков и др., 2016; Михеева, 2016] содержит базу данных землетрясений из более чем 60 каталогов землетрясений. Их источником служат данные различных агентств, включённые в GIS-ENDDB: оперативные и детальные каталоги землетрясений, предоставленные Алтае-Саянским, Байкальским и другими филиалами ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук»

(ФИЦ ЕГС РАН); каталог Японского метеорологического агентства – JMA (~2.723 млн записей), данные которого предоставлены автору Университетом Токио; мировые и региональные каталоги ведущих геофизических служб, в том числе, NEIC [<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>] (с 1973 г. по сей день: ~1.195 млн записей) – мировой каталог Геологической службы США (USGS); а также на порядок более полный и представительный каталог по Центральной и Юго-Восточной Азии в сравнении с NEIC – сводный каталог COMPLEX (объединивший детальные каталоги ФИЦ ЕГС РАН

ряда азиатских и дальневосточных областей и каталог китайской сейсмографической сети CSN [<http://data.earthquake.cn/sjfw/index.html>]; ~1.18 млн записей).

Для приведения каталогов к единой энергетической шкале (магнитуде  $M_S$  определяемой по поверхностным волнам) чаще всего приходится производить её расчёт из класса  $K$  или магнитуды  $m_b$  по полученным автором или известным эмпирическим формулам [Михеева, 2016]. В частности, при вычислении  $M_S$  из  $K$  в программе GIS-ENDDB интерактивно устанавливаются коэффициенты выбранной пользователем линейной формулы пересчёта, например, применяемой в Российской сейсмологической практике для региональных исследований районов Западной и Южной Сибири, а для мировых каталогов – известной эмпирической формулы Ч. Рихтера [Жарков, 1983]. При пересчёте  $M_S$  из  $m_b$  используется приближительная формула  $M_S = (m_b - 2.4) / 0.5556$ , полученная автором эмпирическим путём из соотношения известных пар магнитуд. Кроме того, магнитудные шкалы принято сводить к единой шкале по следующему принципу:  $M_L$  до 5.9 (эта шкала часто используется в практике ФИЦ ЕГС РАН),  $M_S$  – в интервале 5.9–8.0 и моментная магнитуда  $M_w$  – в интервале 8.0–8.3 и выше в краевых частях плит [Вознесенский, 1998].

Основными методами анализа сейсмологических данных в среде GIS-ENDDB являются графические и пространственно-временные методы анализа характеристик сейсмо-геодинамического процесса: угла наклона графика повторяемости ( $b(t)$ ,  $b(s)$ ); изменения суммарной сейсмической энергии ( $E(t)$ ,  $\lg Es/En(s)$ ); сейсмической активности ( $A_{10}$ ,  $A_{15}$ ); параметра плотности сейсмогенных разрывов (метод Жаркова-Завьялова) ( $K_{cp}(t)$ ,  $K_{cp}(s)$ ); стабильности выделения сейсмической энергии ( $1/\sigma(t)$ ,  $\sigma(s)$ ); методы кластерного анализа. Кроме того, в GIS-ENDDB развиваются алгоритмы, позволяющие осуществлять группирование событий в пространственном и пространственно-временном диапазоне (выявления афтершоков, роёв, кластеров, цепочек, эллипсов рассеяния) как для построения детальных сейсмогеодинамических моделей земной коры – выделения современных тектонически активных границ и разломов, так и для изучения распределения космогенных палеоструктур, связанных с историческим прошлым Земли. Недавно также предложена методика уточнения вероятностных оценок пространственного расположения и временного развития сейсмоопасных областей с помощью формали-

зованного метода выявления реальных геологических (линеamentных) структур, концентрирующих опасные события [Михеева, 2016].

Распределение гипоцентров землетрясений является важнейшей характеристикой сейсмического режима. Методы статистического анализа данных сейсмологических каталогов, например, усреднения на единицу площади, нормирования и т.п., широко используемые в сейсмологической практике [Завьялов, 2006; Гитис, Ермаков, 2004; Рогожин и др., 2012; Ружич, Левина, 2012; Sherman, Gorbunova, 2008], реализованы и в системе GIS-ENDDB. Например, предусмотрено множество вариантов расчёта и построения карт сейсмической активности как в классическом виде (долговременной повторяемости землетрясений  $A_{10}$ ,  $A_{15}$ , ... [Ризниченко, 1964]), так и по другим характеристикам проявления сейсмичности:

- по плотности распределения событий заданной величины энергетического класса (число очагов землетрясений на единицу площади величиной  $M_S = M_0 \pm \Delta M$ , где  $M_0$  и  $\Delta M$  – интерактивные параметры метода) (характеристика  $N_\Delta$ );
- по распределению числа эпицентров всех событий заданной выборки ( $N$ );
- по распределению максимальной магнитуды произошедших событий ( $M_{max}$ ).

Для изучения влияния глубинных процессов на сейсмическую активность используется также расчёт характеристики  $H_{max}$  (максимальной глубины землетрясений).

Результаты исследования пространственного распределения сейсмических активизаций в различные промежутки времени дают основание полагать, что сейсмичность активизируется «в одних и тех же местах...» [Рогожин и др., 2012] и зачастую связана с глубинными коровыми и мантийными неоднородностями [Ребецкий и др., 2013], которые могут быть выражены в гравитационных, тепловых и сейсмотомографических полях.

Геоинформационный подход к решению задач геодинамики в среде GIS-ENDDB заключается в сопоставлении результатов описанных выше статистических методов исследования сейсмичности и карт геофизических полей, построенных на основе соответствующих цифровых моделей.

Геофизические данные в виде цифровых моделей, введённые в систему GIS-ENDDB, позволяют выделить дополнительную информацию о свойствах среды в области полученных аномалий, т.е. заверить их соответствие реальным тектоническим структурам. В частности, согласно

[Шерман, 2009], помимо сейсмологических признаков крупных глубинных разломов (приуроченности очагов землетрясений, аномалий сейсмической активности и т.д.), а также магматических признаков (приуроченности вулканов и малых интрузий), существуют и геофизические признаки этих линейных структур, например, высокие градиенты геофизических полей (гравитационного, магнитного, теплового).

Перечислим геолого-геофизические данные, предоставляемые GIS-ENDDB. Это гравиметрическая пространственная модель (данные дистанционного зондирования Земли по алтиметрической гравиметрии [Sandwell et al., 2014]), база данных ежегодных тектономагнитных наблюдений регионов юга Сибири (получены коллективом лаборатории Естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН), данные теплового потока Земли [Тепловое поле..., 1987; Дучков и др., 2001], а также результаты томографии по поперечным SV-волнам [Schaeffer, Lebedev, 2013].

Карты и разрезы этих цифровых моделей дают пользователю некий «геолого-геофизический портрет» прогнозируемых геоструктур [Шнейдер, 2003], а в сопоставлении с картами сейсмической активности – «живую» картину их динамики во времени. Такое сопоставление предлагается осуществлять с помощью метода корреляционного анализа на основе вычисленных величин в интерактивно задаваемых ячейках осреднения.

### Метод корреляционного анализа

Сравнение рассчитываемых аномалий сейсмогеодинамического режима с фоновыми полями осуществляется по графику распределения числа ячеек (узлов)  $N_y$  по разности  $\Delta F$  приведенных значений сравниваемых полей  $F_1$  и  $F_2$  в ячейках, равновеликих для этих полей:

$$\Delta F = \left| \frac{F_1 - F_{1.ОСР}}{F_{1.макс}} - \frac{F_2 - F_{2.ОСР}}{F_{2.макс}} \right|, \quad (1)$$

где  $F_{i.ОСР}$  – усреднённое значение  $F_i$ ;  $F_{i.макс}$  – максимальное отклонение  $F_i$  от  $F_{i.ОСР}$ ,  $i=1, 2$ .

Для выявления неслучайных вариаций гистограммы  $N_y(\Delta F)$  даются на фоне кривой нормального распределения, что позволяет не только визуально (по отклонению первых столбцов от нормы), но и количественно установить степень корреляции полей на исследуемой территории, приняв за норму значение, обратное 33 %:  $k_0=1/33$  (известно, что при нормальном распре-

делении ~68.26 % узлов должны различаться менее, чем на ~33 % от максимальной разности  $F_1-F_2$ ). При этом за суммарный показатель корреляции принимается отношение  $C=k/k_0$ , а за максимальное значение отсутствия корреляции принимается значение этого отношения  $C=1$ . В отличие от классического выборочного коэффициента корреляции  $K$ , принимающего значения от  $-1$  до  $1$ , предложенный параметр  $C$  не является чувствительным к случайным выбросам и всегда положителен, охватывая при этом все возможные случаи:

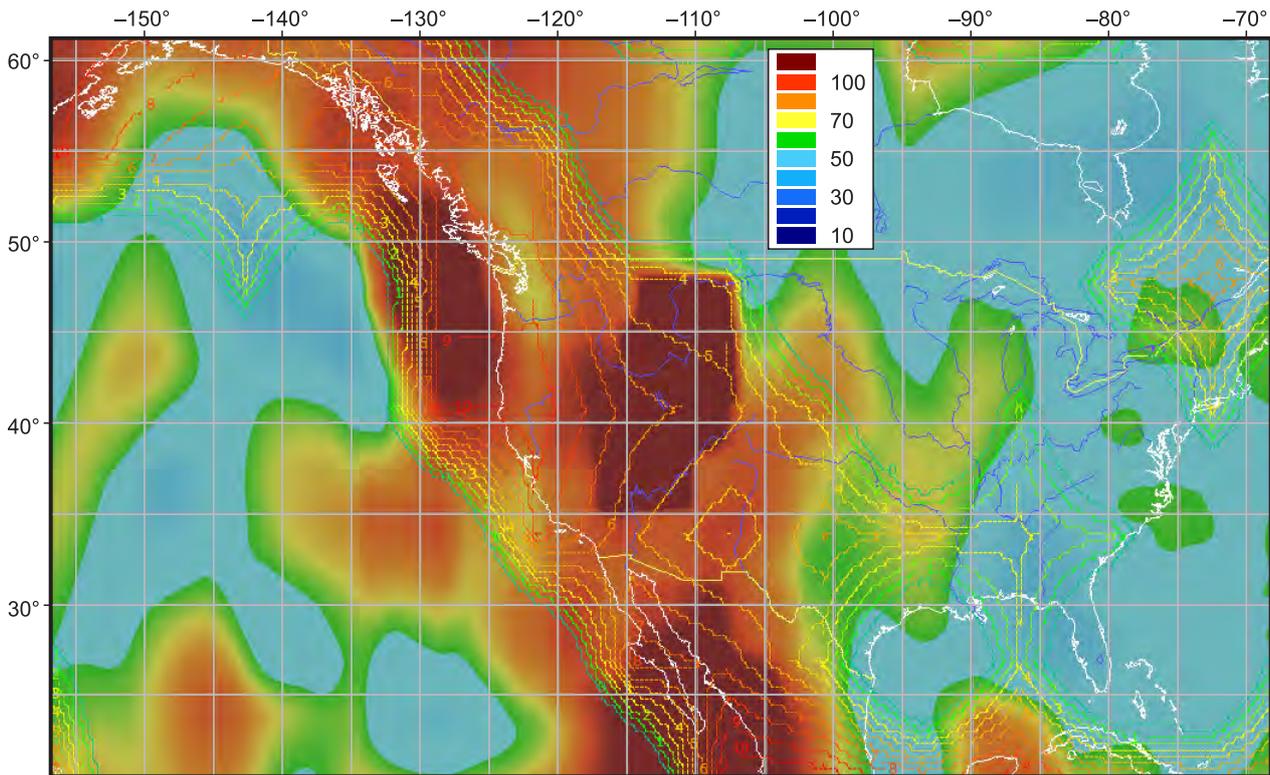
– при распределении  $\Delta F$ , близком к нормальному (что соответствует  $K \sim 0$ ),  $C \sim 1$  (в случае идеально нормального распределения  $C=1$ );

– при аномально большом количестве малых значений разности  $\Delta F$  (близких к нулю)  $C > 1$  или даже  $C \gg 1$  (так, в случае  $K=1$  значение  $C$  будет стремиться к бесконечности  $C \rightarrow \infty$ );

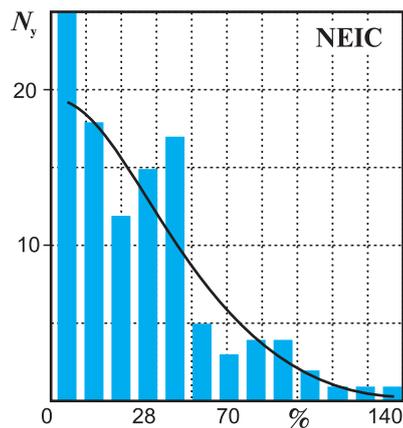
– если же гистограмма  $N_y(\Delta F)$  не только не отражает закон нормального распределения, но и показывает случайный характер отклонения от него (например, при недостаточно представительной выборке), то  $C < 1$ .

### Примеры применения метода

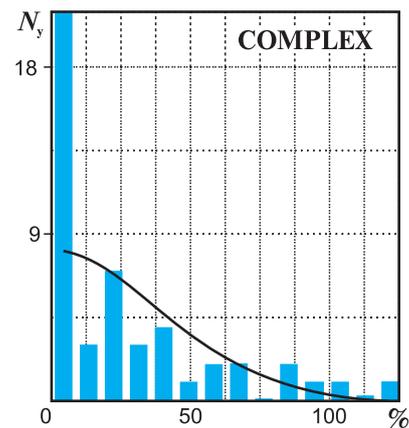
Изучение взаимосвязи теплового поля с сейсмической активностью является как прикладной [Булаева и др., 2015], так и фундаментальной задачей сейсмогеодинамики. В среде GIS-ENDDB визуальный анализ [Михеева, Соколова, 2016] взаимосвязи сейсмической активности и величины теплового потока (ТП) показал наилучший результат при использовании третьего из перечисленных выше методов расчёта сейсмической активности: характеристики  $M_{\max}$  – максимальной зафиксированной магнитуды землетрясений (рис. 1). Был сделан вывод [Михеева, Соколова, 2016], что если к исходному полю ТП применить включённую в GIS-ENDDB функцию трансформации, то при равенстве размера ячейки для расчёта  $M_{\max}$  и параметра  $R$  трансформации ТП визуально наблюдается хорошее соответствие в конфигурациях изолиний  $M_{\max}$  и ТП (рис. 1) [Михеева, Соколова, 2016]. Например, при  $R=800$  км для событий Северной Америки изолинии  $M_{\max} \geq 4$ ,  $H \geq 15$  км в целом соответствуют изолиниям ТП со значениями  $\geq 80$  мВт/м<sup>2</sup> (рис. 1а). Для Азиатского региона при выбранном усреднении  $R=800$  км изолинии максимальной энергии с небольшим смещением совпадают с распределением региональной составляющей ТП для глубинной сейсмичности ( $H \geq 50$  км) [Михеева, Соколова, 2016].



а



б



в

**Рис. 1:** а – изолинии  $M_{\max}$  на фоне региональной компоненты ТП ( $mVt/m^2$ ) (GIS-ENDDB) в Северной Америке (NEIC,  $M_S \geq 4$ ,  $H \geq 15$  км) [Михеева, Соколова, 2016] (отмечены верхние значения  $M_{\max}$  для изолиний 1, 5 и 9); б, в – распределение числа узлов по  $\Delta F$  (1) (параметра корреляции сеток  $M_{\max}$  и ТП) на фоне графика нормального распределения  $\Delta F$  (тонкими линиями показаны графики нормального распределения значений полей  $F_1$  и  $F_2$ ) в процентах:

б – 23 % узлов различаются менее чем на 5 %, а 80 % – менее чем на 28 % от максимального разброса  $\Delta F$ ;  
 в – для сравнения – 44 % узлов во Внутри-Азиатской области (30–40°N; 66–84°E, COMPLEX,  $M_S \geq 4$ ,  $H \geq 50$  км) [Михеева, Соколова, 2016] различаются менее чем на 5 %, а 80 % узлов – менее чем на 25 %

Построение зависимости  $N_y(\Delta F)$  для исследованных в [Михеева, Соколова, 2016] территорий показало, что по величине первого столбца можно выявить степень корреляции сравниваемых полей, в частности, наблюдается слабая корреляция (рис. 1б) в области Северо-Американского континента (рис. 1а), высокая

корреляция (рис. 1в) – во Внутри-Азиатской области и полное отсутствие корреляции – во всей Азиатско-Дальневосточной области [Михеева, Соколова, 2016].

Для более формального оценивания величины корреляции рассчитывается параметр  $C$ . Для этого при построении гистограмм

осуществляется поиск такого шага осреднения  $\Delta F$ , при котором первый столбец составляет ~68.3 % от полного числа землетрясений. Полученный шаг (в %) приводится к нормальному значению (33 %), что равнозначно расчёту отношения их обратных значений:  $C=k/k_0$ .

Полученные гистограммы сравнения полей ТП и  $M_{\max}$  показывают:

1 – умеренную корреляцию в области на рис. 1а для Северо-Американского континента (каталог NEIC,  $M \geq 5$ , ячейка  $3 \times 4^\circ$ ):  $C=2.1$  (хотя по распределению числа эпицентров всех событий заданной выборки  $N$  в сравнении с полем ТП показатель корреляции очень высок:  $C=3.1$ , а для классической сейсмической активности  $A_{10}$ :  $C=3$ );

2 – отсутствие корреляции по всему Азиатско-Дальневосточному региону (COMPLEX,  $M \geq 4$ ,  $H \geq 50$  км, ячейка  $6 \times 8^\circ$ ):  $C=0.75$  (для характеристики  $N$ :  $C=1.45$ );

3 – хорошую корреляцию в прямоугольной области, охватывающей Внутри-Азиатский горный пояс (рис. 1в), в том числе, Памиро-Гиндукушскую сейсмофокальную зону ( $30-40^\circ\text{N}$ ;  $66-84^\circ\text{E}$ , COMPLEX,  $M \geq 5$ ,  $H \geq 50$  км, ячейка  $1 \times 1^\circ$ ):  $C=2.4$ .

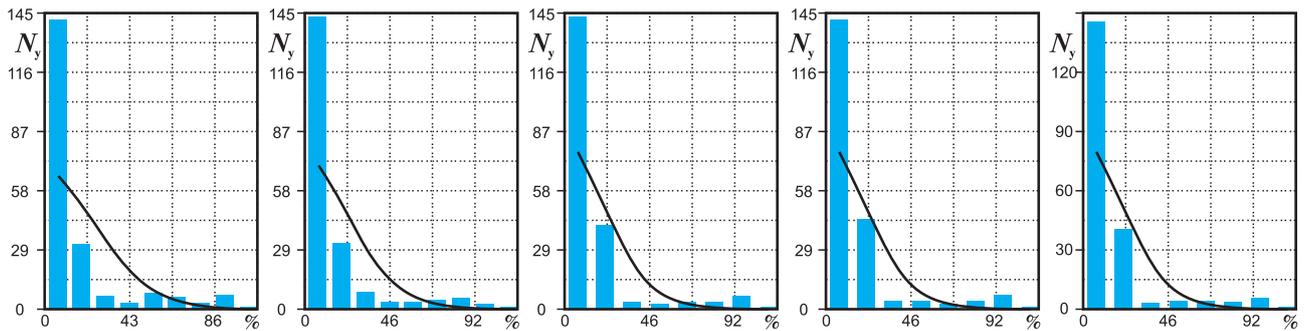
Сравнительный анализ для области (3) по различным парам сейсмогеодинамических ( $N$ ,  $A_{10}$ ,  $A_7$ ,  $M_{\max}$ ,  $H_{\max}$ ) и геофизических полей (ТП и  $\Delta g$ ) показал наибольшее значение корреляции  $C=2.5$  при сравнении полей  $H_{\max}$  и ТП (COMPLEX,  $M \geq 5$ , ячейка  $1 \times 1^\circ$ ) (рис. 2). При расширении области (3) до  $6-58.2^\circ\text{N}$ ;  $36.7-119.4^\circ\text{E}$  (избегая захвата зон субдукции) при прочих равных условиях  $C=3$  (для  $M_{\max}$  –  $C=2.6$ ), а при добавлении условия  $H \geq 50$  км наибольшее значение корреляции  $C=3.7$  достигается для характеристики  $M_{\max}$  (для  $H_{\max}$  –  $C=2.9$ ), что характеризует вклад крупных глубоких землетрясений, локализованных в областях с повышенным тепловым потоком. При увеличении размера ячейки ( $3 \times 4^\circ$ ) наибольшее значение корреляции снова показывают изолинии  $H_{\max}$  ( $C=2.24$ ), а изолинии других характеристик – близкие к нему значения: для  $N$ :  $C=2.24$ , для  $M_{\max}$  –  $C=2.2$ , для  $A_{10}$  –  $C=2$ .

Для области Северо-Американского континента зависимость различных вариантов расчёта сейсмической активности от теплового потока не является столь же одинаковой по величине (рис. 3), варьируя в диапазоне значений параметра  $C$ : от 1.17 до 2.5. Большой разброс характерен при рассмотрении землетрясений всех глубин. Для наглядности на рис. 3 показаны исходные распределения  $N_y(\Delta F)$ , без приведения шага осреднения гистограмм к уровню 68.3 % для первого столбца.

При расширении области исследования Северо-Американского континента (до размеров  $14.2-70.7^\circ\text{N}$ ;  $148.8-61.9^\circ\text{W}$ ) при прочих равных параметрах значения суммарной корреляции  $C$  значительно возрастают, несмотря на сохранение разброса, и очень высоки для всех характеристик сейсмической активности по сравнению с другими регионами:  $A_{10}$  ( $C=4.1$ ),  $N$  ( $C=4$ ),  $H_{\max}$  ( $C=3.9$ ),  $M_{\max}$  ( $C=2.7$ ). Более низкие значения корреляции  $M_{\max}$  с ТП можно объяснить вкладом особенно крупных землетрясений, относящихся к «холодному» и «хрупкому» слою.

### Обсуждение результатов

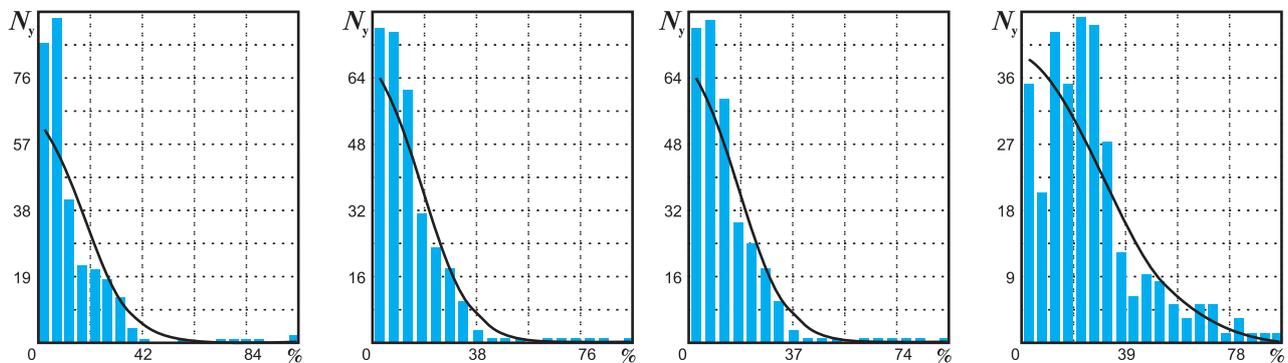
В последние годы появилось множество работ [Коптев, Ершов, 2011; Хуторской и др., 2015; Жантаев, Виляев, 2017; Сакварелидзе, Кутелия, 2017] о визуально выявляемой корреляции распределения теплового потока, сейсмичности и основных тектонических структур различных территорий. Выявлено, что повышенные значения теплового потока и сейсмичности отражают активизацию процессов проявления новейшей тектонической активности, связанной с относительно неглубокими очагами плавления горных пород [Коптев, Ершов, 2011], например, в областях рифтогенных растяжений земной коры, вулканотектонической деятельности [Хуторской и др., 2015] и т.д. Влияние теплового режима на сейсмичность проявляется в этих зонах через развитие сейсмогенных напряжений и изменение прочности среды, что в свою очередь связано с флюидным режимом [Жантаев, Виляев, 2017], в то время как ультрамедленные процессы теплопереноса, которые запущены миллионы лет назад, не отражаются в современной сейсмической активности [Хуторской и др., 2015]. Что же касается тех внутриплатформенных областей, которые не характеризуются растяжением или вулканической активностью, то и здесь крупные катастрофические землетрясения относятся именно к зонам повышенных значений ТП, хотя землетрясения среднего энергетического класса приурочены преимущественно к областям пониженных значений ТП, что в цитируемых работах связывают с повышенной хрупкостью «холодных» горных пород коры. Приуроченность крупных землетрясений к зонам повышенного ТП объясняют накоплением термоупругих напряжений в земной коре в результате частичного плавления пород [Жантаев, Виляев, 2017; Сакварелидзе, Кутелия, 2017], а также вертикальными горообразовательными движениями («вспучиванием») горных пород над зонами плавления [Сакварелидзе, Кутелия, 2017].



**Рис. 2.** Гистограммы зависимости  $N_y(\Delta F)$  при сравнении трансформированного поля теплового потока и полей распределения различных характеристик сейсмической активности (слева направо):

$$H_{\max} (C=2.5), M_{\max} (C=2.4), A_{10} (C=2.28), A_7 (C=2.26), N (C=2.23).$$

Параметры выборки: прямоугольная географическая область, охватывающая Внутри-Азиатский горный пояс (30–40°N; 66–84°E), каталог COMPLEX,  $M \geq 5$ ,  $H \geq 50$  км, ячейка  $1 \times 1^\circ$ . Показаны приведённые по шагу осреднения гистограммы согласно описанной в тексте методике



**Рис. 3.** Гистограммы зависимости  $N_y(\Delta F)$  при сравнении трансформированного поля теплового потока и полей распределения различных характеристик сейсмической активности (слева направо):

$$H_{\max} (C=2.5), N (C=2.3), A_{10} (C=2.3), M_{\max} (C=1.17).$$

Параметры выборки: географическая область Северо-Американского континента (17.3–70.0°N; 148.0–82.9°W), каталог NEIC,  $M \geq 5$ , ячейка  $3 \times 4^\circ$

В свете этих наблюдений можно трактовать полученные в данной работе результаты следующим образом. В областях, характеризующихся высокими значениями суммарного параметра корреляции  $C$ , повышение сейсмической активности и увеличение интенсивности ТП обусловлены преимущественно мантийными высокотемпературными процессами (например, в областях Внутри-Азиатского горного пояса и Северо-Американского континента). Именно на этих территориях наилучшую корреляцию с полем ТП показывает характеристика  $H_{\max}$  (максимальная глубина землетрясений), указывая на существующую глубинную природу сейсмичности. При этом для выявления влияния на сейсмичность мантийных процессов необходимо исключение из рассмотрения умеренной сейсмичности, связанной с хрупким разрушением в земной коре, которая, как показано выше, не

имеет связи с ТП. С этой целью задаётся ограничение выборки землетрясений по магнитуде ( $M \geq 5$ ) и по глубине. Эта процедура значительно увеличивает значение корреляции  $C$ . При задании глубины нужно предположительно оценивать глубину заложения мантийных сейсмогенных неоднородностей в каждом конкретном регионе.

Апробация предлагаемого корреляционного метода на примере ряда территорий показывает следующие его особенности.

1. Чаще всего различные характеристики сейсмической активности ( $N$ ,  $A_{10}$ ,  $A_7$ ,  $M_{\max}$ ,  $H_{\max}$ ) в сравнении с полем теплового потока показывают близкие значения параметра корреляции  $C$ . Случаи значительного отклонения какой-либо из перечисленных характеристик по значению  $C$  объясняются геодинамическими особенностями рассматриваемой области.

2. Выявленные в [Михеева, Соколова, 2016] значительные смещения аномалий сейсмической активности относительно ТП в зонах субдукции существенно снижают количественные значения параметра  $C$ , т.е. предлагаемый корреляционный метод не выявляет в качестве коррелированных поля, регулярно смещённые друг относительно друга (отвечающие параллельному переносу или повороту).

3. Увеличение размера ячейки осреднения не влияет на рост параметра  $C$ . Увеличение количества ячеек (которое происходит при детализации расчёта или расширении территории), напротив, приводит к значительному росту  $C$ . Это говорит о том, что предлагаемый метод чувствителен к количеству ячеек с нулевыми значениями полей.

### Заключение

Реализованный в геоинформационной системе GIS-ENDDDB метод корреляционного анализа основан на расчёте разности  $\Delta F$  приведённых значений сравниваемых полей в равновеликих ячейках осреднения. В сравнении участвуют расчётные (по характеристикам сейсмической активности) и измеренные (по данным геофизических измерений) поля. Метод демонстрирует возможность количественного описания взаимосвязей выбранных полей, которые ранее оценивались визуально. Предложены два способа оценивания степени корреляции: графический (выявление неслучайных вариаций гистограммы распределения  $N_y(\Delta F)$  по отклонению первых столбцов относительно графика нормального распределения) и количественный (вычисление суммарного параметра корреляции  $C$ , показывающего соотношение плотностей распределения гистограммы  $N_y(\Delta F)$  к нормальному распределению). Метод показал хорошее количественное соответствие сделанным ранее визуальным оценкам о взаимосвязи различных полей. Использование большого разнообразия характеристик сейсмической активности позволяет выявить влияние различных геодинамических особенностей региона на суммарную корреляцию расчётных и измеренных полей изучаемой территории.

### Литература

Булаева Н.М., Дадашев М.Н., Мурсалов Р.Р. Система сбора и визуализации сейсмологической информации // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2015. — № 3. — С. 35–41.

Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // Соросовский образовательный журнал. — 1998. — № 2. — С. 101–108.

Гитис В.Г., Ермаков Б.В. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике. — М.: Физматлит, 2004. — 256 с.

Дучков А.Д., Шварцман Ю.Г., Соколова Л.С. Глубинный тепловой поток Тянь-Шаня: достижения и проблемы // Геология и геофизика. — 2001. — Т. 42, № 10. — С. 1516–1531.

Жантаев Ж.Ш., Виляев А.В. Влияние теплового поля на формирование сейсмического режима Северного Тянь-Шаня // Триггерные эффекты в геосистемах. Сборник материалов IV Всероссийской конференции с международным участием. — М.: ГЕОС, 2017. — С. 365–372.

Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. — М.: Наука, 1983. — 416 с.

Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация. — М.: Наука, 2006. — 254 с.

Коптев А.И., Ершов А.В. Термальная мощность литосферы Земли: численная модель // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2011. — № 5. — С. 25–32. (Карта: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1185694&uri=01.jpg>).

Михеева А.В. Геоструктурные элементы, выявляемые математическими алгоритмами и цифровыми моделями геоинформационно-вычислительной системы GIS-ENDDDB. — Новосибирск: Омега Принт, 2016. — 300 с.

Михеева А.В., Дядьков П.Г., Марчук А.Г., Егоров А.А. Геоинформационные технологии экспертной системы GIS-ENDDDB («Базы данных природных катастроф Земли») // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. — 2016. — Т. 14, вып. 3. — С. 49–60.

Михеева А.В., Соколова Л.С. О возможной взаимосвязи сейсмичности и теплового поля по данным GIS-ENDDDB // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. — Обнинск: ГС РАН, 2016. — С. 204–208.

Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Напряжённое состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области // Геология и геофизика. — 2013. — Т. 54, № 2. — С. 271–291.

Ризниченко Ю.В. Метод суммирования землетрясений для изучения сейсмической активности // Известия АН СССР. Серия Геофизическая. — 1964. — № 7. — С. 969–977.

Рогожин Е.А., Шен Д., Родина С.Н. Сопоставление сеймотектонических особенностей Горного и Монгольского Алтая // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2012. — Т. 39, № 3. — С. 5–20.

Ружич В.В., Левина Е.А. Сейсмомиграционные процессы как отражение внутренней динамики в зонах

- внутриплитных и межплитных разломов // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе. В 2-х т. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. – Т. 2. – С. 71–74.
- Сакварелидзе Е.А., Кутелия Г.А.* О связи аномалий теплового поля и зон сейсмической опасности на примере кавказского региона // Труды Института геофизики им. М. Нодиа. – 2017. – Т. LXVII. – С. 50–54.
- Тепловое поле недр Сибири* / Ред. Э.Э. Фотиади. – Новосибирск: Наука, 1987. – 196 с.
- Хуторской М.Д., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Кременецкая Е.О., Кваерна Т.* Сейсмичность, тепловой поток и тектоника западно-арктического бассейна // Мониторинг. Наука и технологии. – 2015. – Т. 3, № 24. – С. 23–32.
- Шерман С.И.* Тектонофизические параметры разломов литосферы, избранные методы изучения и примеры использования [Электронный ресурс] // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы первой молодёжной школы семинара. – 2009. – URL: [www.ifz.ru/fileadmin/user\\_upload/subdivisions/506/Konferencii/2009/PDF/Sherman.pdf](http://www.ifz.ru/fileadmin/user_upload/subdivisions/506/Konferencii/2009/PDF/Sherman.pdf)
- Шнейдер А.А.* Линейные магнитные аномалии океана. – М.: Наука. – 2003. – С. 508–526.
- Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R.* New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // Science. – 2014. – V. 346, N 6205. – P. 65–67. – doi: 10.1126/science.1258213
- Schaeffer A.J., Lebedev S.* Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone // Geophysical Journal International. – 2013. – V. 194. – P. 417–449.
- Sherman S.I., Gorbunova E.A.* Variation and origin of fault activity of the Baikal rift system and adjacent territories in real time // Earth Science Frontiers. – 2008. – V. 15, N 3. – P. 337–347.

#### Сведения об авторе

**Михеева Анна Владленовна**, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН); ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: [anna@omzg.sscg.ru](mailto:anna@omzg.sscg.ru)

## The correlation analysis of spatial anomalies of computed and measured fields by the GIS-ENDDDB system

© 2020 A.V. Mikheeva<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ICM&MG SB RAS, Novosibirsk, Russia; <sup>2</sup>IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia

**Abstract** The GIS-ENDDDB expert-information system includes the global seismic catalogs and measurement data for various geophysical fields. Statistical processing of these data and visualization of the distributing characteristics of the seismic-geodynamic process in the form of isolines make it possible to reveal the spatial relationship between the seismicity distribution and anomalies of geophysical fields. The first attempts to identify this relationship were made with L.S. Sokolova in 2016 based on a visual comparison of maps obtained as a result of applying methods of various data analysis (in particular, the isolines maps of the maximum magnitude of recorded earthquakes  $M_{\max}$ ) for different samples of seismological catalogs on the one hand, and various modifications of the measured geophysical fields (in this case, the regional component of heat flow (HF) field) on the other hand. These results were more likely qualitative, but later a correlation analysis function was implemented into GIS-ENDDDB for the quantitative comparison of the fields. The correlation analysis is carried out on a histogram of the distributing number of cells (nodes)  $N_C$  from the difference  $\Delta F$  of the reduced values of the fields  $F_1$  and  $F_2$  (relative to the arithmetic mean  $F_{i,GSR}$ ) in the cells that are equal for the compared fields. To identify non-random variations,  $N_C$  histograms ( $\Delta F$ ) are given against the background of the normal distribution curve, which allows not only visually (by the deviation of the first columns from the norm), but also quantitatively to establish the degree of correlation. For the studied territories, histograms were obtained that show: 1. a moderate correlation of HF and  $M_{\max}$  fields in the North American continent (NEIC catalog,  $M \geq 5$ , cell  $3 \times 4^\circ$ ); 2. no correlation across the Asia - Far East region (COMPLEX,  $M \geq 4$ ,  $H \geq 50$  km, cell  $6 \times 8^\circ$ ); and 3. high correlation in a rectangular region covering the Inside-Asian mountain belt ( $30-40^\circ N$ ;  $66-84^\circ E$ , COMPLEX,  $M \geq 5$ ,  $H \geq 50$  km, cell  $1 \times 1^\circ$ ).

**Keywords** correlation analysis, catalogs and databases, earthquake, seismic and geodynamic process, geophysical fields.

**For citation** Mikheeva A.V. (2020). The correlation analysis of spatial anomalies of computed and measured fields by the GIS-ENDDDB system. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(1), 103-112. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.10>

### References

- Bulaeva, N.M., Dadashev, M.N., & Mursalov, R.R. (2015). [System for collecting and visualizing seismological information]. *Probl. bezopas. i chrezv. situatsiy* [Security and Emergency Issues], 3, 35-41. (In Russ.).
- Duchkov, A.D., Schwartzman, Yu.G., & Sokolova, L.S. (2001). [Tien Shan deep heat flow: achievements and problems]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 42(10), 1516-1531. (In Russ.).
- Fotiadi, E.E. (ed.) (1987). *Teplovoye pole nedr Sibiri* [Thermal Subsoil Field of Siberia]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 196 p. (In Russ.).
- Gitis, V.G., & Ermakov, B.V. (2004). *Osnovy prostranstvenno-vremennogo prognozirovaniya v geoinformatike* [The basics of spatial-temporal forecasting in geoinformatics]. Moscow, Russia: Fizmatlit Publ., 256 p. (In Russ.).
- Khutorskoy, M.D., Antonovskaya, G.N., Basakina, I.M., Kremenetskaya, E.O., & Kvaerna, T. (2015). [Seismicity, Heat Flow, and Tectonics of the West-Arctic Basin, Monitoring]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii* [Science and technology], 3(24), 23-32. (In Russ.).
- Koptev, A.I., & Ershov, A.V. (2011). [Thermal power of the Earth's lithosphere: a numerical model]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya* [Moscow University Bulletin. Series 4: Geology], 5, 25-32. Available at: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1185694&uri=01.jpg> (In Russ.).
- Mikheeva, A.V. (2016). *Geostrukturnyye elementy, vyyavlyayemye matematicheskimi algoritmami i tsifrovymi modelyami geoinformatsionno-vychislitel'noy sistemy GIS-ENDDDB* [Geostructural elements detected by mathematical algorithms and digital models of geographic information-computing system GIS-ENDDDB]. Novosibirsk, Russia: Omega Print Publ., 300 p. (In Russ.).
- Mikheeva, A.V., & Sokolova, L.S. (2016). [About the possible interrelation of seismicity and thermal field according to GIS-ENDDDB]. In *Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy XI Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly (Otv. red. A.A. Malovichko)* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data.

- Proceedings of the XI International Seismological Workshop (Ed. A.A. Malovichko)] (pp. 204-208). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Rebetsky, Yu.L., Kuchai, O.A., & Marinin, A.V. (2013). [The stress state and deformations of the Earth's crust of the Altai-Sayan mountain region]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 54(2), 271-291. (In Russ.).
- Riznichenko, Yu.V. (1964). [The method of summing earthquakes to study seismic activity]. *Izv. AN SSSR. Ser. Geophys* [News of the USSR Academy of Sciences. Ser. Geophys.], 7, 969-977. (In Russ.).
- Rogozhin, E.A., Shen J., & Rodina, S.N. (2012). [Comparison of seismotectonic features of the Gorny and Mongolian Altai]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Issues of engineering seismology], 39(3), 5-20. (In Russ.).
- Ruzhich, V.V., & Levina, E.A. (2012). [Seismic migration processes as a reflection of internal dynamics in zones of intraplate and interplate faults]. In *Sovremennaya geodinamika Tsentral'noi Azii i opasnye prirodnye protsessy: rezul'taty issledovaniy na kolichestvennoi osnove. T. 2* [Modern geodynamics of Central Asia and dangerous natural processes: results of studies on a quantitative basis. V. 2] (pp. 71-74). Irkutsk, Russia: IEC SB RAS. (In Russ.).
- Sakvarelidze, E.A., & Kutelia, G.A. (2017). [On the relationship between thermal field anomalies and seismic hazard zones on the example of the Caucasus region]. *Trudy Instituta geofiziki im. M. Nodia* [Proceedings of the M. Nodia Institute of Geophysics], LXVII, 50-54. (In Russ.).
- Sandwell, D.T., Müller, R.D., Smith, W.H.F., Garcia, E., & Francis, R. (2014). Global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 re-veals buried tectonic structure. *Science*, 346(6205), 65-67. doi: 10.1126/science.1258213
- Schaeffer, A.J., & Lebedev, S. (2013). Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone. *Geophysical Journal International*, 194, 417-449.
- Schneider, A.A. (2003). *Lineynyye magnitnyye anomalii okeana* [Linear magnetic anomalies of the ocean] (pp. 508-526). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Sherman, S.I. (2009). [Tectonophysical parameters of the lithosphere faults, selected study methods and examples of use] [Electronic resource]. In *Sovremennaya tektonofizika. Metody i rezul'taty. Materialy pervoy molodezhnoy shkoly seminara* [Modern Tectonophysics. Methods and results. Materials of the 1 youth school seminar]. Available at: [www.ifz.ru/fileadmin/user\\_upload/subdivisions/506/Konferencii/2009/PDF/Sherman.pdf](http://www.ifz.ru/fileadmin/user_upload/subdivisions/506/Konferencii/2009/PDF/Sherman.pdf) (In Russ.).
- Sherman, S.I., & Gorbunova, E.A. (2008). Variation and origin of fault activity of the Baikal rift system and adjacent territories in real time. *Earth Science Frontiers*, 15(3), 337-347.
- Voznesensky, E.A. (1998). [Earthquakes and soil dynamics]. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal* [Soros Educational Journal], 2, 101-108. (In Russ.).
- Zavyalov, A.D. (2006). *Srednesrochnyy prognoz zemletryaseny. Osnovy, metodika, realizatsiya* [Mid-term earthquake forecast. Basics, methodology, implementation]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 254 p. (In Russ.).
- Zhantaev, Z.Sh., & Vilyaev, A.V. (2017). [The influence of the thermal field on the formation of the seismic regime of the Northern Tien Shan]. In *Triggernyye efekty v geosistemakh. Sb. Mat. IV Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Trigger effects in geosystems. Proc. IV All-Russian Conference with international participation] (pp. 365-372). Moscow, Russia: GEOS Publ. (In Russ.).
- Zharkov, V.N. (1983). *Vnutrenneye stroyeniye Zemli i planet* [The internal structure of the Earth and planets]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 416 p. (In Russ.).

#### Information about author

**Mikheeva Anna Vladlenovna**, PhD, Researcher of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM&MG SB RAS); Senior Researcher of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: [anna@omzg.sccc.ru](mailto:anna@omzg.sccc.ru)