

Н.А. Кузьменко

(ЗАО "РТИ-Инвест"; e-mail: antonetskna2016@yandex.ru)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПАСНЫХ ЭНДОГЕННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Предлагается методика оценки территориально-динамических характеристик опасных эндогенных геофизических процессов. Методика может быть использована для оптимального управления ресурсами МЧС России в условиях возникновения указанных выше процессов.

Ключевые слова: параметры, вулканическая деятельность, сейсмичность, оценка, моделирование, сейсмическая энергия.

N.A. Kuzmenko

TECHNIQUE OF ASSESSMENT FOR TERRITORIAL AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF DANGEROUS ENDOGENOUS GEOPHYSICAL PROCESSES

The technique of assessment for territorial and dynamic characteristics of dangerous endogenous geophysical processes is offered. The technique can be used for optimal control of Emercom of Russia resources in the conditions of emergence of the processes stated above.

Key words: parameter, volcanic activity, seismicity, seismic energy, assessment, modeling.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 18 мая 2016 г.

Введение

Опасными эндогенные процессы связаны с проявлением сейсмической и вулканической активностей, которые тесно связаны между собой как во временном, так и в пространственном отношениях [1, 2, 5, 7, 9, 10]. Это обуславливает актуальность решения задачи выявления важнейших параметров пространственно-временной динамики опасных эндогенных геофизических процессов как в глобальном масштабе, так и в пределах конкретного региона. Данная задача тесно связана с задачей построения траекторий миграции сейсмической энергии, дающих возможность предугадать, когда и где произойдут опасные для населения земные катастрофы. Результаты решения указанной задачи являются исключительно важными для оптимального управления силами и средствами МЧС России в условиях возникновения опасных геодинамических процессов.

Параметры вулканических извержений и землетрясений

Очевидно, что базовым параметром, позволяющим единообразно оценивать интенсивность как землетрясения, так и вулканического извержения является энергия, которая выделяется при возникновении как сейсмического, так и вулканического события.

Мощность вулканических извержений, по имеющимся данным [4, 9,10], в среднем измеряется величиной, близкой к 10^{16} Дж, что сопоставимо с землетрясением энергетического класса магнитудой около 7,5.

Поэтому для лучшего сопоставления энергии, выделяющейся при сейсмических и вулканических событиях, целесообразно принимать в расчёт землетрясения только в диапазоне магнитуд $M = 6,0-8,5$.

Анализ распределения выделившейся за всё известное время наблюдений энергии в глобальном масштабе (рис. 1), показал, что наиболее показательным, с точки зрения решения указанных выше задач, является территория, ограниченная точками с координатами (80° в.д., 30° ю.ш.); (80° в.д., 70° с.ш.); (180° в.д., 70° с.ш.); (180° в.д., 30° ю.ш.). На рис. 1 эта территория выделена прямоугольником красного цвета.

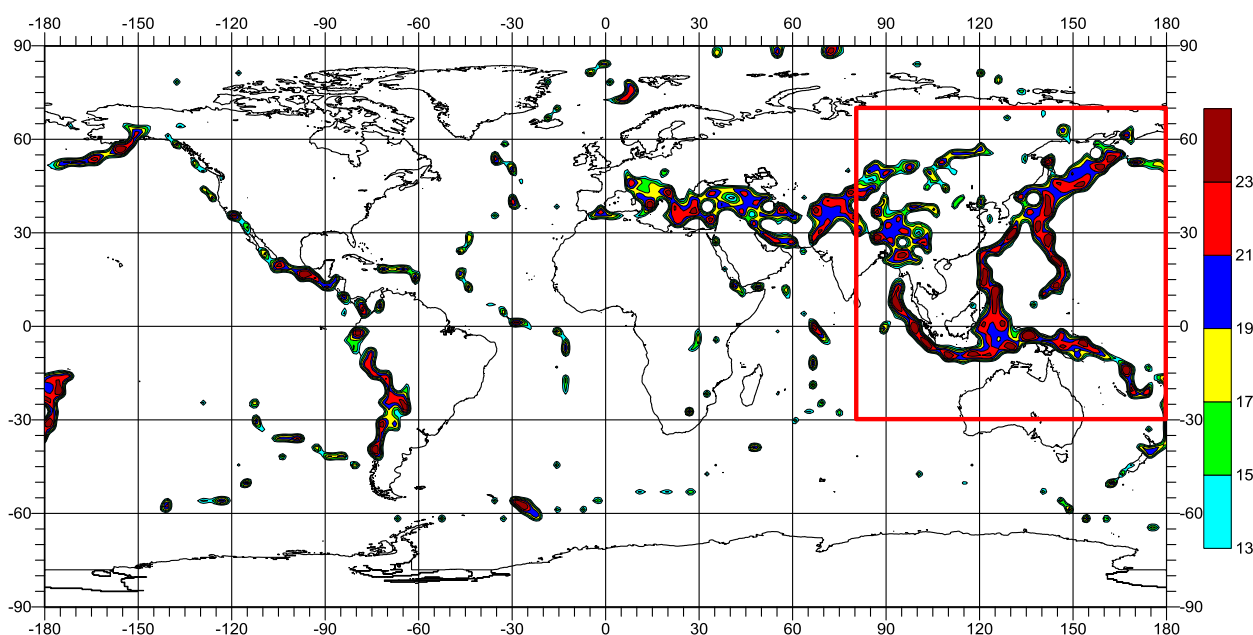


Рис. 1. Глобальное распределение выделившейся энергии (в $\lg E$) вследствие сейсмических и вулканических процессов ($E = 10^{13}-10^{23}$ Дж)

Показательной эта территория является по следующему ряду факторов:

- территория является наиболее высокоэнергетической;
- существует практически весь диапазон выделившейся энергии;
- на территории располагается часть тихоокеанского сейсмического пояса;
- наличие соседствующего расположения эпицентров высокоэнергетических землетрясений (рис. 2) и активных вулканов (рис. 3);
- на рассматриваемой территории находится значительная часть России (Дальний Восток, большая часть Сибири) с расположенными на них объектами критической инфраструктуры (военными и стратегическими), применительно к которым предупреждение земных катастроф является исключительно важным мероприятием.

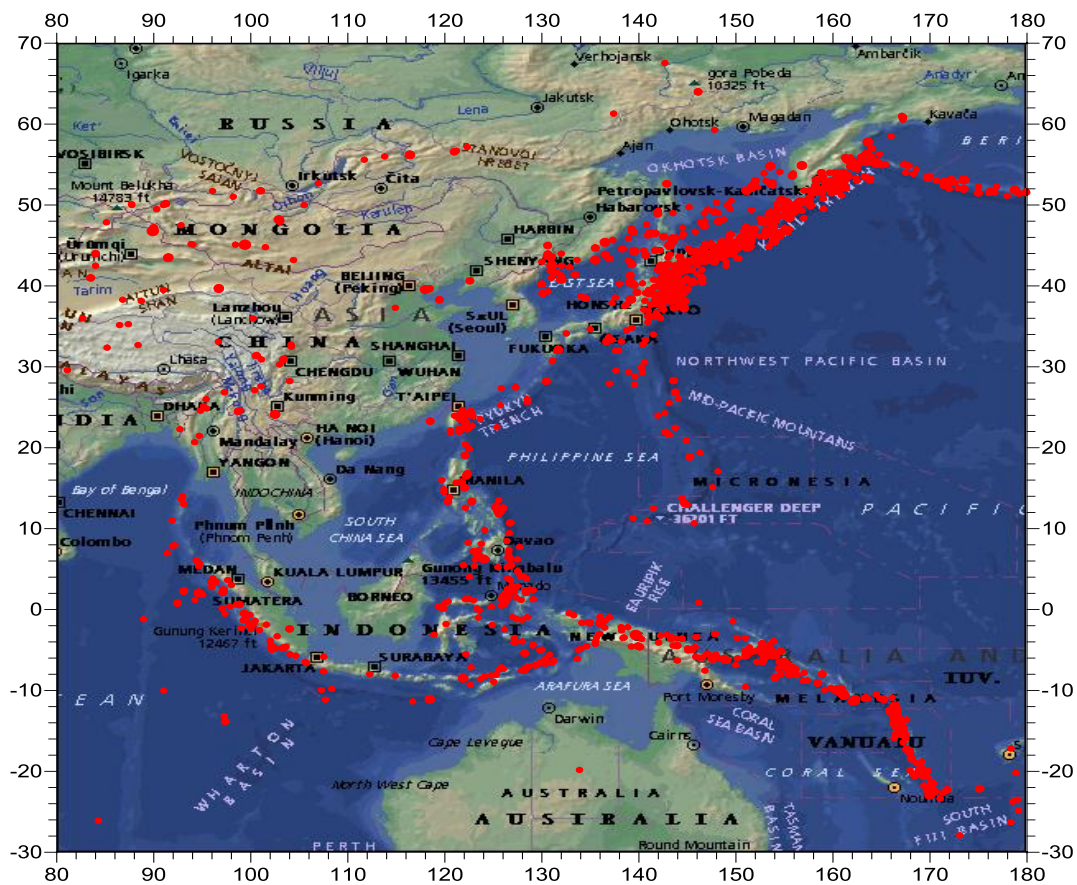


Рис. 2. Распределение эпицентров произошедших землетрясений с магнитудой $M = 6,0-8,5$ на территории модельного региона

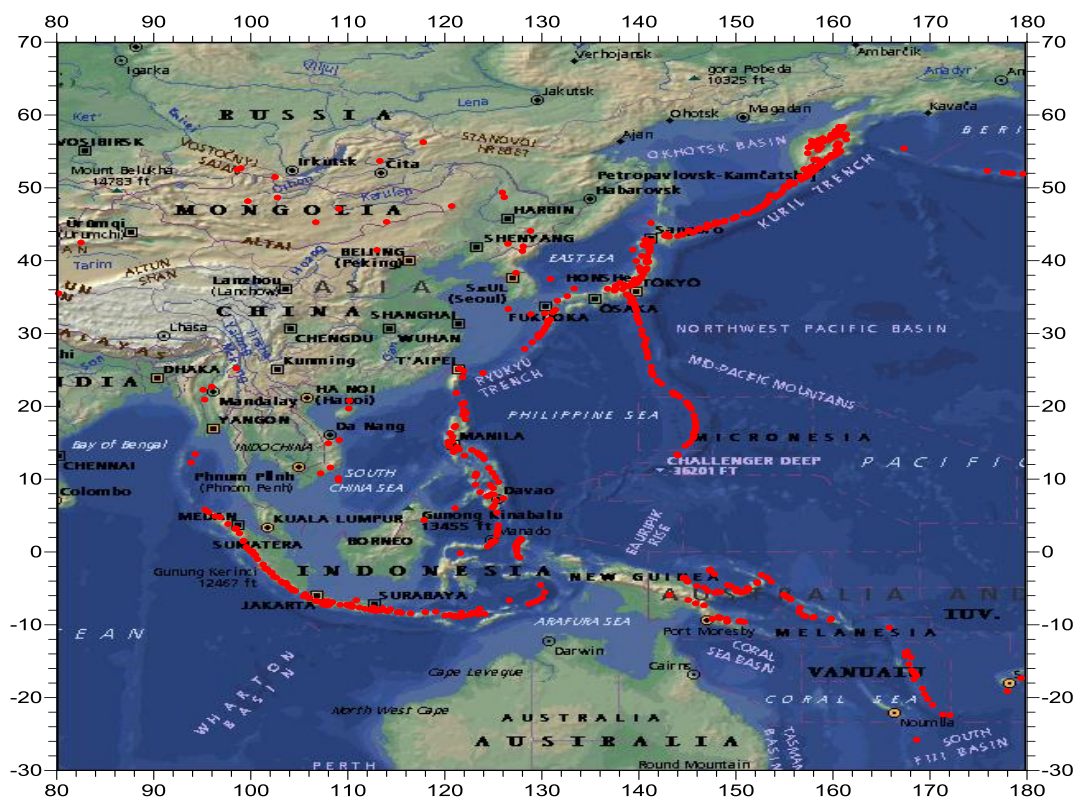


Рис. 3. Распределение вулканов на территории модельного региона

Совокупное наличие всех указанных факторов обуславливает собой выбор этой территории в качестве модельного тестового полигона для решения задачи построения траекторий миграции сейсмической энергии в отдельно взятом регионе.

Рассмотрим параметры, которые необходимы для создания математической модели, позволяющей строить траекторию миграции сейсмической энергии. Назовём её эндогенно-геологической энергией, поскольку мы рассматриваем не только сейсмическую, но и вулканическую активность.

Поскольку в настоящей статье рассматриваются вопросы определения параметров для исследования пространственно-динамических характеристик опасных эндогенных геологических процессов, то к ним, кроме выделившейся энергии, необходимо отнести следующие.

1. Относительную плотность потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды, отнесённую к единице объёма этой среды (измеряется в Дж/м³).

Под относительной плотностью потенциальной энергии деформируемых пород геосреды E_p будем понимать энергию, накопленную в единице условного объёма (1 м³) за условную единицу времени (1 год). Для оценок этого параметра используется следующее соотношение [5]:

$$E_p = 2\tau^2 / 3\mu = 2[\eta\gamma'(1 - e^{-\mu t/\eta})]^2 / 3\mu = 2[\mu\gamma't(1 - e^{-\mu t/\eta})]^2 / 3\mu, \quad (1)$$

где τ – полное касательное напряжение;

μ – модуль упругости;

η – вязкость геологической среды;

γ' – скорость деформации;

t – промежуток времени.

Данный параметр, вследствие своей относительной природы, позволяет сравнивать эндогенно-геологическую активность различных по своему тектоническому строению регионов и территорий.

2. Горизонтальные смещения в геологической среде рассматриваемой территории.

Данный параметр является либо измеряемым экспериментально, либо расчётным на основе модельных построений. Наблюдения значений горизонтальных смещений в геологической среде известны не для всех регионов, поэтому выберем расчётный метод определения этой величины. Причём, нас будут интересовать не столько величины радиальных смещений в геологической среде, сколько их составляющие, то есть проекции этого вектора на горизонтальные оси координат. Это позволит получить пространственно-территориальное распределение векторов горизонтальных смещений на любом глубинном уровне.

Распределение векторов горизонтальных смещений характеризует неоднородности различных по своему генезису геологических структур [1, 5-7]. Так, чётко определенные направленные "потoki" векторов указывают на нали-

чие значительных активных тектонических нарушений. Разумеется, употребляемый нами термин “потоки” условен, поскольку в действительности в условиях геологической среды никаких потоков нет, векторы показывают лишь тенденцию, динамику развития геологических процессов.

3. Третьим определяющим параметром являются сдвиговые напряжения. Они не только позволяют оценить параметр E_p , но и являются важными для анализа эндогенно-геологической активности территории. Причём, важно знать не только численные значения полных сдвиговых напряжений, но и как ориентированы векторы горизонтальных и вертикальных сдвиговых напряжений.

Геодинамические напряжения, как сдвиговые, так и нормальные, определяются расчётным путём. Очень важно при этом помнить, в каких пределах нужно получить значения указанных напряжений.

Дело в том, что при переходе от модельных безразмерных величин в оценках геодинамических напряжений к конкретным значениям возникают трудности. Они связаны со следующими причинами:

- отсутствие экспериментальных данных о величине фоновых сдвиговых напряжений в земной коре;
- отсутствие данных об усреднённых значениях параметров упругости для всей толщи земной коры (они обычно вычисляются через скорости распространения упругих волн по сейсмотомографическим данным) [8-10];
- скорости упругих волн усреднены для различных глубин земной коры;
- в оценках коэффициента Пуассона наблюдается достаточно большой разброс.

Поэтому очень важен контроль вычисляемых значений геодинамических напряжений при их сопоставлении с реальными данными.

4. Параметры упругости λ , μ и вязкости η для земной коры различны на разных глубинных уровнях.

Для определения упругих модулей λ , μ необходима информация по глубинному распределению скоростей продольных V_p и поперечных V_s волн, а также данные по глубинному распределению плотности среды:

$$\begin{cases} V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}; \\ V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \end{cases} \quad (2)$$

где ρ – плотность геологической среды.

Используя их, можно оценить глубинное распределение прочностных свойств геологической среды путем определения численных значений прочностных коэффициентов, входящих в расчётные соотношения для определения геодинамических напряжений и смещений в геологической среде.

Тогда глубинное распределение прочностных параметров геологической среды для какого-либо региона можно определить на основании следующей системы:

$$\begin{cases} V_S^2(x, y, z) = \frac{\mu(x, y, z)}{\rho(x, y, z)}; \\ V_P^2(x, y, z) = \frac{\lambda(x, y, z) + 2\mu(x, y, z)}{\rho(x, y, z)}. \end{cases} \quad (3)$$

Разрешая эту систему, получим:

$$\begin{cases} \mu(x, y, z) = \rho(x, y, z) \cdot V_S^2(x, y, z); \\ \lambda(x, y, z) = \rho(x, y, z) \cdot (V_P^2(x, y, z) - 2V_S^2(x, y, z)). \end{cases} \quad (4)$$

Для определения указанных выше параметров в качестве исходных используются следующие имеющиеся в свободном доступе данные:

- гравитационная модель EGM96 (Lemoine et al, 1998);
- глобальная модель CRUST 2.0, содержащая информацию о структурно-вещественном составе земной коры (данные по скоростям сейсмических волн, плотности земной коры на различных глубинах и генезису отдельных участков земной коры) (Bassin et al., 2000; Mooney et al., 1998);
- цифровая модель рельефа ETOPO5 (National Geophysical Data Center, 1988).

На основе совместного анализа указанных данных и соотношений (4) получены распределения упругих модулей для различных глубинных уровней земной коры. Например, на рис. 4 представлено распределение значений упругого модуля μ для территории рассматриваемого нами модельного региона. Конфигурации изолиний на этом рисунке говорят о соответствии распределения пониженных значений данного модуля сети тектонических разломных структур в модельном регионе.

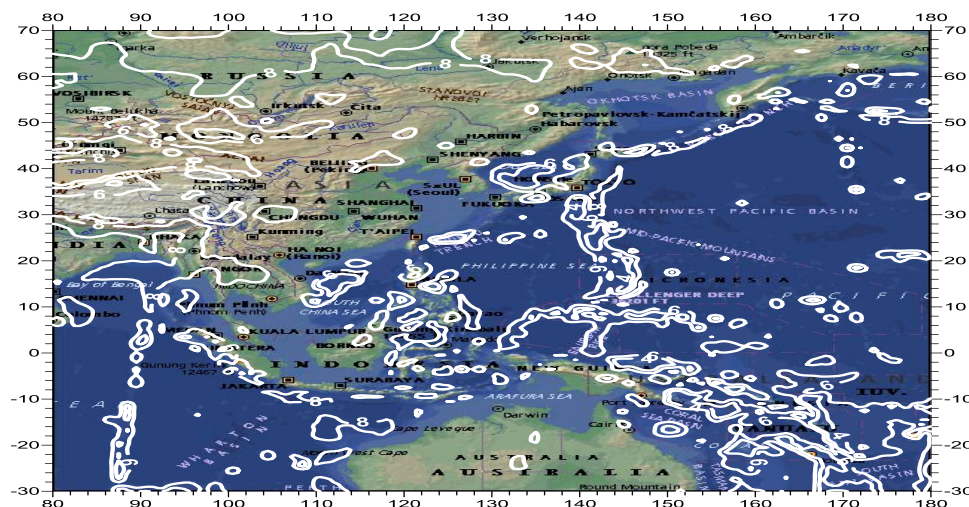


Рис. 4. Распределение упругого модуля ($\mu = 2 \cdot 10^{10} - 8 \cdot 10^{10}$ Па) на территории модельного региона. Глубина – 33 км

При построении указанных распределений использована сплайн-обработка данных, рассчитанных по соотношениям (4). Необходимость такой обработки обусловлена следующими обстоятельствами:

1) поля исходных данных были представлены в виде сеточных файлов по неравномерной сетке значений;

2) при извлечении данных из глобальных массивов полученные матрицы величин, используемых в дальнейших расчётах, имели различную размерность, что приводило к несоответствию данных по координатным сеткам.

Поэтому возникла необходимость приведения матриц значений к единой размерности. При реализации данной процедуры была применена интерполяция бикубическим сплайном по двумерному полю значений [3].

Что касается определения вязкости η для различных глубинных уровней земной коры, отметим следующее.

Обычно в модельных построениях предполагается, что вязкость по всей толщине рассматриваемого модельного слоя (модели слоя земной коры) остается постоянной. Однако реальная вязкость среды существенным образом зависит от её температуры. Согласно работе [2], вязкость связана с накоплением тех или иных дефектов в кристаллической решетке деформируемого вещества и, следовательно, с процессами активации, отражающими процессы изменения решеточной энергии.

В таком случае можно воспользоваться для расчёта вязкости следующей формулой:

$$\eta(T) = A_k e^{\frac{U_a}{R_2 T}}, \quad (5)$$

где U_a – энергия активации;
 R_2 – газовая постоянная;
 A_k – некоторая постоянная.

Как показано в работе [2], постоянные коэффициенты A_k достаточно хорошо известны по результатам экспериментальных исследований. Так, например, для базальта известны величины $\lg \eta = 7,8$ при $T = 1523 \text{ }^\circ\text{K}$, а $\Delta \lg \eta_0 = 1,0$ при $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{K}$, то энергия активации U_a может быть определена из следующего соотношения:

$$\lg \eta - \lg \eta_0 = 0,43 \frac{U_a}{R_2 T} \left[\exp \left(- \int_0^p \frac{\partial \ln U}{\partial \ln V} \frac{dP}{K_{\text{Ламе}}} \right) \right]. \quad (6)$$

В таком случае можно получить следующее выражение для учета изменений вязкости от температуры геологической среды:

$$\eta(T) = A_k \exp \left[\frac{U_a}{R_2 T(z)} \exp \left(2,5 \frac{P(z)}{K_{\text{Ламе}}} \right) \right], \quad (7)$$

где $P(z) = \rho g z$;
 $T(z) = 20z + 0,05z^2 - 0,0017z^3$.

Учитывая изменение давления и температуры геосреды с глубиной, получим окончательное выражение для расчёта изменения вязкости:

$$\eta(z) = A_x \exp \left[\frac{U_a}{R_z T(z)} \exp \left(\frac{2,5 \rho g z}{\lambda + \frac{2}{3} \mu} \right) \right], \quad (8)$$

где $A_x = 10^{\lg \eta_0 - 0,43 \frac{U_a}{R_z T_p}}$.

Используя соотношение (8), в которое входят уже определённые величины упругих модулей, были выполнены оценочные расчёты вязкости геологической среды для различных глубинных уровней, что было использовано в ходе дальнейших расчётов, в частности, для оценки скорости деформаций γ' с учётом релаксации:

$$\gamma' = \frac{\tau_0 e^{-t/\delta}}{\mu t + \eta(1 - e^{-t/\delta})}, \quad (9)$$

где τ_0 – начальное касательное напряжение;

$\delta = \eta/\mu$ – время релаксации;

μ – модуль сдвига;

η – вязкость среды;

t – время.

Алгоритм оценки параметров

Итак, мы достаточно подробно рассмотрели, каким образом можно определить параметры геологической среды. В заключение, резюмируя вышесказанное, представим блок-схему алгоритма оценки параметров, необходимых для исследования регионально связанных вулканических процессов и землетрясений (рис. 5).

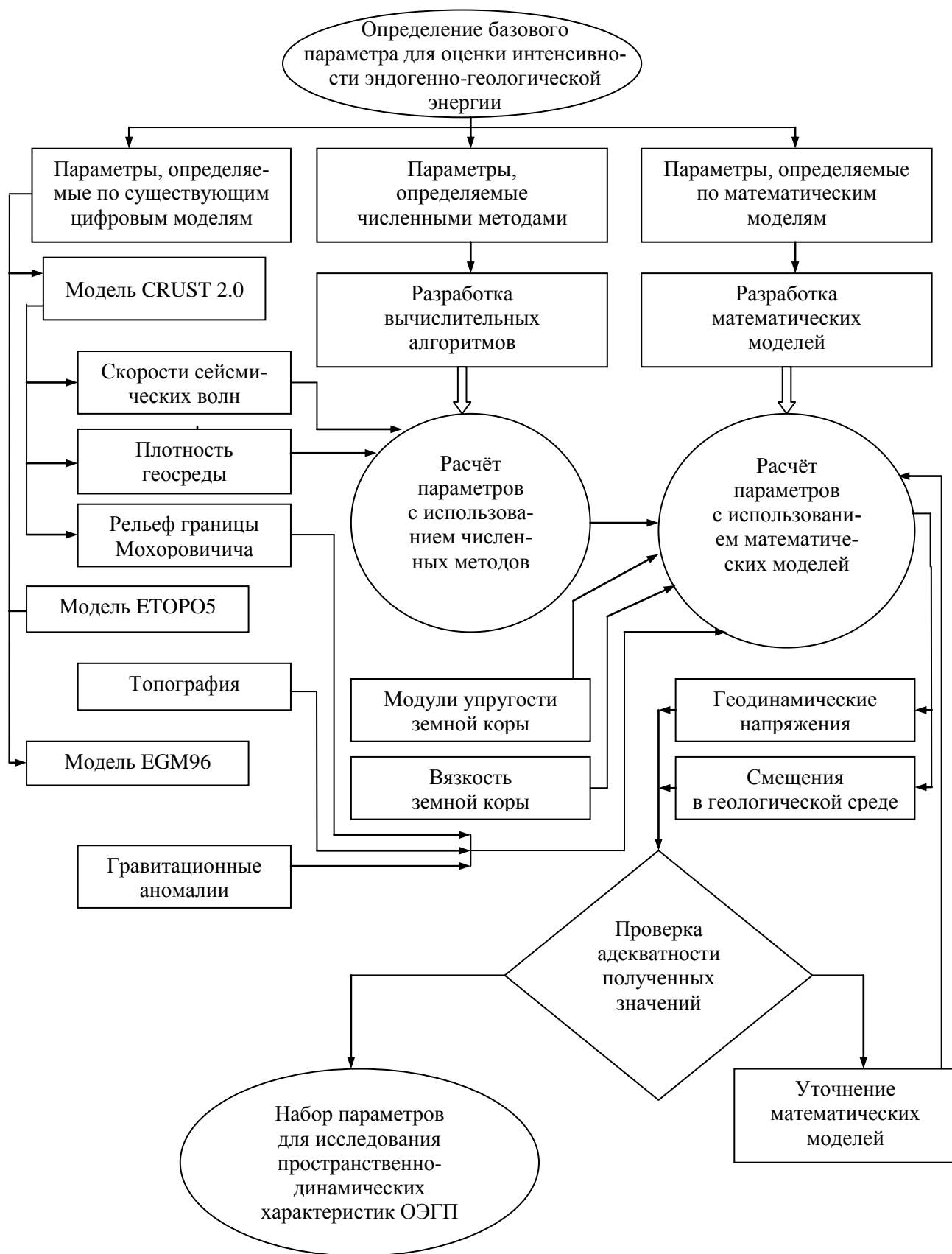


Рис. 5. Блок-схема алгоритма оценки параметров, необходимых для исследования пространственно-динамических характеристик опасных эндогенных геологических процессов

Выводы

1. Процессы, связанные с проявлением сейсмической и вулканической активностей, тесно связаны между собой во временном и в пространственном отношениях. Это актуализирует задачу построения траекторий миграции сейсмической энергии, дающей возможность прогнозировать время и место опасных земных катастроф. Результаты решения этой задачи выступают источником информации для оптимального управления силами и средствами МЧС России и других оперативных служб в условиях возникновения опасных геодинамических процессов.

2. Основными параметрами оценки сейсмических и вулканических явлений являются: энергия, которая выделяется при возникновении как сейсмического, так и вулканического события; относительная плотность потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды; горизонтальные смещения в геологической среде; сдвиговые напряжения; параметры упругости и вязкости для земной коры.

3. Эффективное решение задачи оценки параметров может быть осуществлено на основе использования детальной методики анализа пространственно-динамических характеристик опасных эндогенных геологических процессов, включающей их классификацию, обоснование выбора параметров, способы нахождения их численных значений, а также графическую интерпретацию пространственного распределения параметров для модельного региона исследований.

Литература

1. *Абрамова А.В., Бондарь К.М., Данилов Р.М., В.А. Минаев В.А. и др.* Моделирование геодинамических рисков в чрезвычайных ситуациях: монография. Хабаровск: РИО ДВЮИ МВД России, 2014. 124 с.
2. *Артюшков Е.В.* Геодинамика. М., Наука, 1979. 327 с.
3. *Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошников В.Л.* Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980. 352 с.
4. *Мальшев А.И.* Жизнь вулкана. Екатеринбург: изд-во УрО РАН, 2000. 262 с.
5. *Минаев В.А., Фаддеев А.О.* Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М.: Финансы и статистика, Изд. дом ИНФРА-М, 2009. 370 с.
6. *Минаев В.А., Фаддеев А.О., Данилов Р.М. и др.* Математическое моделирование сейсмических рисков // Спецтехника и связь. 2013. № 5. С. 58-63.
7. *Минаев В.А., Фаддеев А.О., Абрамова А.В.* Разломно-узловая тектоническая модель оценки геодинамической устойчивости территориальных систем // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 1 (29). С. 90-99.
8. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 310 с.
9. *Соболев Г.А.* Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. № 4/5. 1999. С. 63-72.
10. *Тараканов Р.З.* Сейсмический потенциал Курило-Охотского региона // Проблемы сейсмической опасности Курило-Камчатского региона. Т. VI. Южно-Сахалинск, 1997. С. 95-110.