

Доклад ведущего научного сотрудника МГТУ им. Н.Э. Баумана  
доктора технических наук, профессора **Минаева В.А.**  
на пленарном заседании 25-й международной научно-технической конференции  
"Системы безопасности – 2016" (26 ноября 2016 г.)<sup>1</sup>

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ОПАСНЫХ ЭНДОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**



### ***Введение***

Исследованиям опасных природных эндогенных геологических процессов (ЭГП), под которыми понимаются процессы, связанные с энергией, возникающей в недрах Земли, посвящено большое количество научных работ. Но до сих пор не найден ответ на злободневный вопрос – где и когда произойдет следующее землетрясение или пробудится очередной вулкан? И практически не затронуты вопросы оценки пространственно-динамических характеристик опасных ЭГП, с точки зрения построения траекторий миграции энергии, выделившейся в результате реализации сейсмического или вулканического события. Между тем, в последнее время достаточно бурное развитие получили методы математического моделирования геодинамических рисков [1-5], позволяющие осуществлять анализ напряжений и смещений в геологической среде для любого глубинного уровня.

---

<sup>1</sup> Доклад опубликован в сборнике трудов конференции:  
Минаев В.А., Топольский Н.Г., Фаддеев А.О., Кузьменко Н.А. Моделирование миграции опасных эндогенных геологических процессов // Материалы 25-й международной научно-технической конференции "Системы безопасности – 2016". М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. С. 14-20.

### Математическая модель

Авторами создана новая трёхмерная математическая модель миграции энергии опасных ЭГП и сформулированы граничные условия существования модели. Последние представлены в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \sigma_z(x, y, h) + \rho(x, y, h)gu_z(x, y, h) = 0; \\ \sigma_z(x, y, 0) + \delta\rho gu_z(x, y, 0) = \rho(x, y, 0)\Delta g_u(x, y)H(x, y); \\ \tau_{xz}(x, y, h) = 0; \\ \tau_{xz}(x, y, 0) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_z$  – вертикальные нормальные напряжения;

$\tau_{xz}$  – сдвиговые вертикальные напряжения в плоскости XZ (в плоскости YZ условия для вертикальных сдвиговых напряжений будут аналогичными);

$u_z$  – вертикальные смещения в геологической среде;

$\delta\rho$  – скачок плотности на границе раздела земная кора – литосферная мантия (на границе Мохо);

$\rho$  – значение плотности на соответствующей глубине и в соответствующей точке с координатами  $(x, y)$ ;

$\Delta g_u(x, y)$  – значение аномалии гравитационного поля в точке с координатами  $(x, y)$ ;

$H(x, y)$  – глубина залегания границы Мохо;

$g$  – ускорение свободного падения;

$h$  – толщина модельного пространства.

Поясним уравнения системы (1). Первое уравнение – это условие о компенсации воздействий на верхней границе модели (дневной поверхности Земли). Второе уравнение – условие влияния возмущений от распределённой нагрузки на нижней границе модели (границе Мохо). Третье и четвёртое уравнения системы (1) отражают факт отсутствия вертикальных сдвиговых напряжений на верхней и нижней границах модельного пространства.

Подставим в граничные условия (1) соотношения для соответствующих компонент тензора геодинамических напряжений ( $\sigma_z; \tau_{xz}$ ) и вертикальной составляющей смещений  $u_z$  в геологической среде [2]:

$$\begin{cases} \sigma_z^{(k)}(x, y, z) = k^2 \left\{ \left[ \frac{\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dz) \right] shkz + \left[ \frac{\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Cz) \right] chkz \right\} \cos k_x x \cos k_y y; \\ \tau_{xz}^{(k)}(x, y, z) = k k_x \left\{ \left[ k(A + Cz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} D \right] shkz + \left[ k(B + Dz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} C \right] chkz \right\} \sin k_x x \cos k_y y; \\ u_z^{(k)}(x, y, z) = \frac{k}{2\mu} \left\{ \left[ \frac{2\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Cz) \right] shkz + \left[ \frac{2\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dz) \right] chkz \right\} \cos k_x x \cos k_y y, \end{cases} \quad (2)$$

где  $k_x = \frac{\pi m}{a}$ ;  $k_y = \frac{\pi n}{b}$ ;  $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  ( $m, n$  – порядковые номера гармоник по осям  $X$  и  $Y$ );

$\lambda, \mu$  – прочностные характеристики геологической среды (постоянные Ламе или модули упругости и сдвига, соответственно);

$a$  – длина модельного пространства (по оси  $X$ );

$b$  – ширина модельного пространства (по оси  $Y$ );

$A, B, C, D$  – неизвестные коэффициенты, определённые в исследовании.

Полагается, что величины  $\rho, \lambda, \mu$  являются функциями от переменных  $x, y, z$ . Рассмотрено решение вопроса, связанного с учётом кривизны поверхности Земли. Исследован регион в районе Сибири и Дальнего Востока, захватывающий также Тихий океан и некоторые зарубежные территории, представляющийся в виде трёхмерного упруго-вязкого слоя шириной 11086 км (по широте), длиной в среднем 11131 км (по долготе) и толщиной (глубиной) 66 км.

С использованием модели (1)-(2) предложен следующий подход к построению траектории миграции эндогенно-геологической (ЭГ) энергии:

1. Траектория миграции ЭГ-энергии проходит по тем областям, где располагаются участки концентрации максимальных сдвиговых напряжений, или, что одно и то же, участки наибольшей относительной плотности потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды.

2. В пределах одного глубинного уровня ЭГ-энергия мигрирует там, где наиболее значительные по величине горизонтальные сдвиговые напряжения или горизонтальные смещения в геологической среде, при этом вертикальные сдвиговые напряжения быть по своей величине пренебрежимо малы по сравнению с горизонтальными сдвиговыми напряжениями.

3. На тех участках, где происходит перемещение ЭГ-энергии с одного глубинного уровня на другой, наоборот должны быть значимыми по величине вертикальные сдвиговые напряжения.

### Результаты моделирования

Применение математической модели, основываясь на предложенном подходе, дало возможность получить очень важные результаты при компьютерном моделировании миграции ЭГ-энергии. Рассмотрим эти результаты. Для удобства их представления территорию исследуемого региона разделим на меньшие по площади участки (рис. 1, 2).

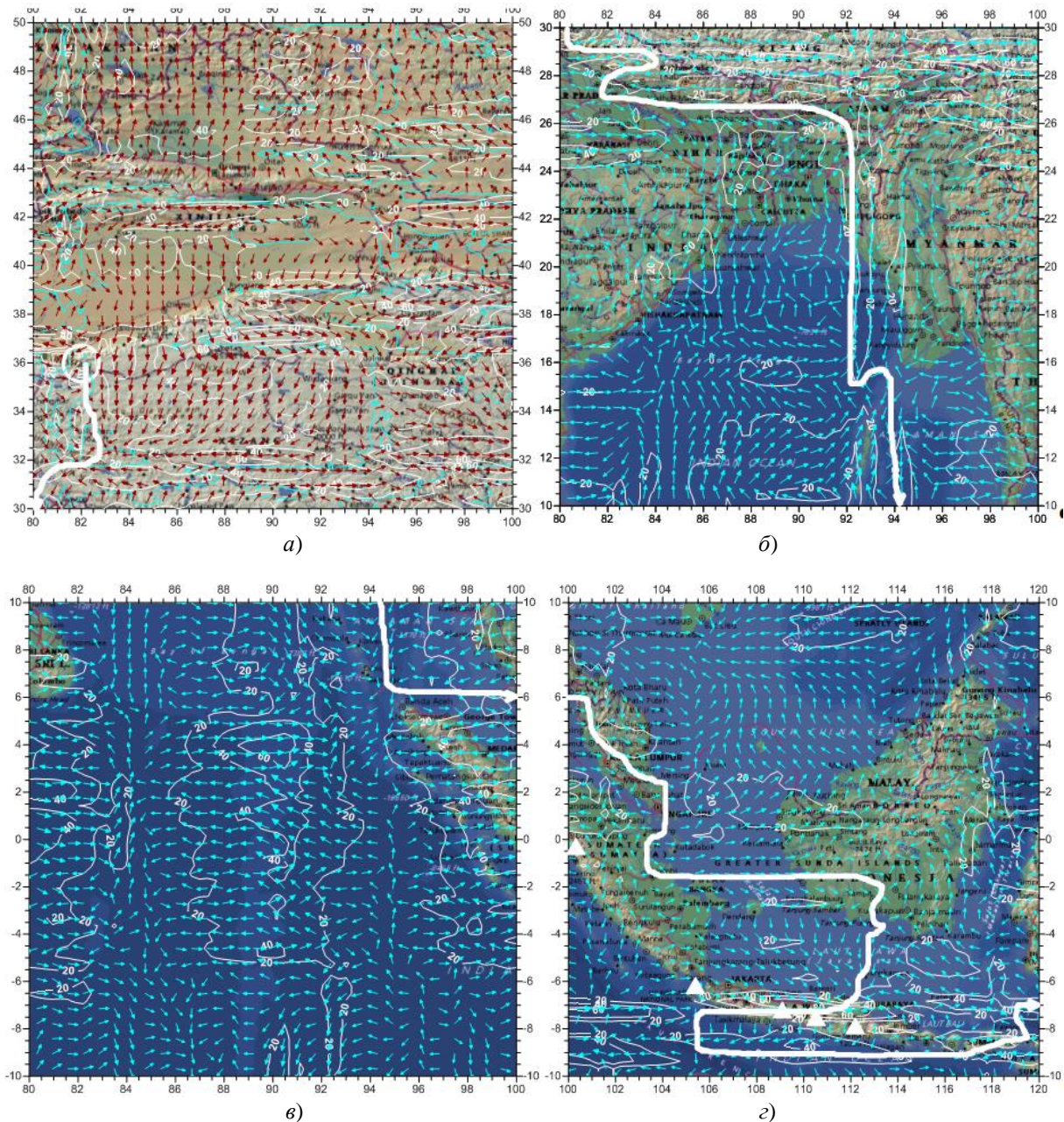


Рис. 1. Траектория последовательной миграции ЭГ-энергии с распределениями пространственно-динамических характеристик ЭГП



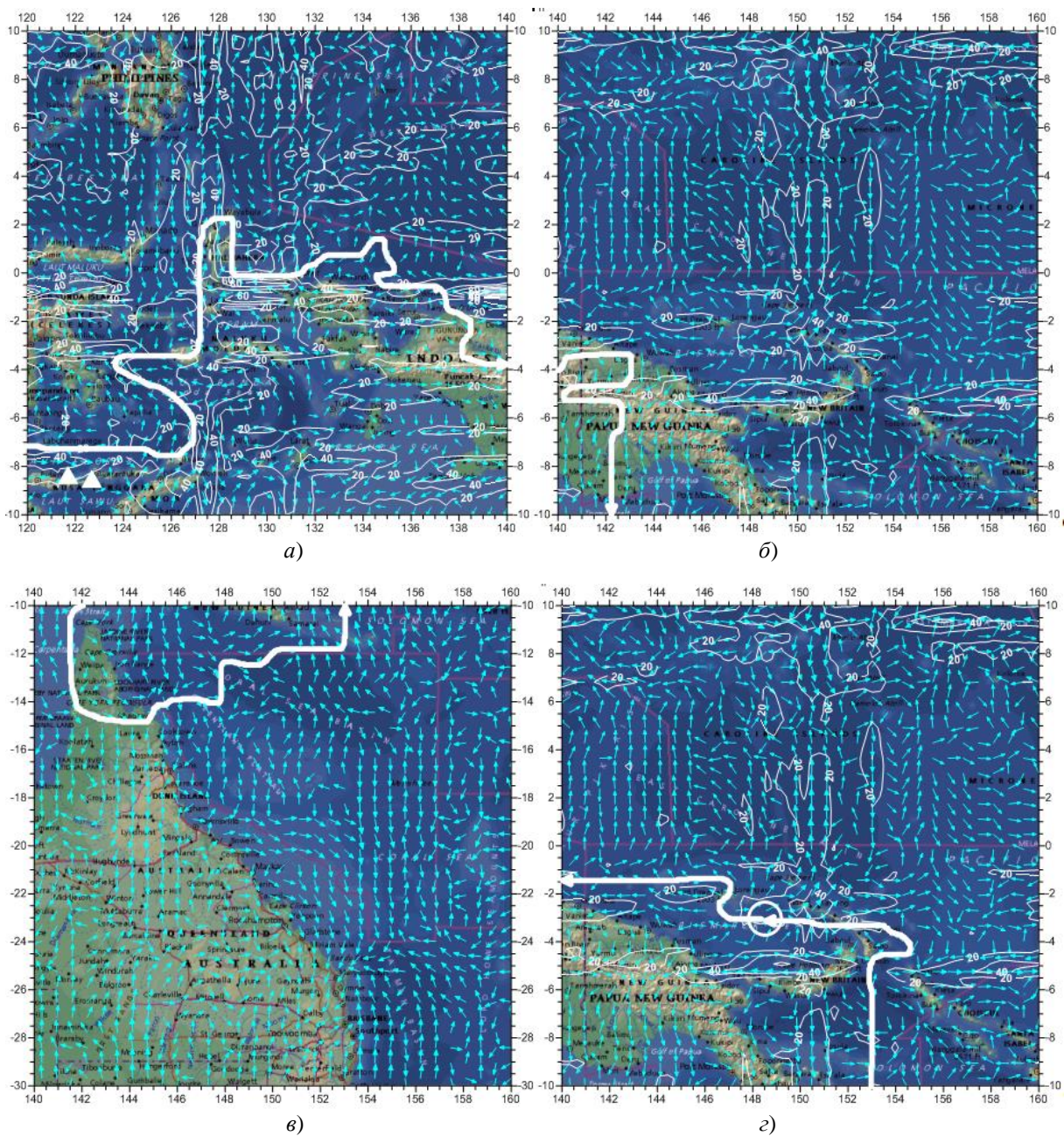


Рис. 2. Траектория последовательной миграции ЭГ-энергии с распределениями пространственно-динамических характеристик ЭП

На рис. 1а показано, что первое реальное землетрясение в моделируемой их последовательности произошло на участке с координатами границ  $30^{\circ} \div 50^{\circ}$  с.ш. –  $80^{\circ} \div 100^{\circ}$  в.д., эпицентр землетрясения (левый верхний фрагмент) обозначен окружностью белого цвета, из него выходит толстая линия белого цвета со стрелкой на конце – траектория миграции ЭГ-энергии. Далее из рис. 1 и 2, состоящих из восьми связанных фрагментов, следует, что траектория миграции ЭГ-энергии (на рис. 1б-1г,

рис. 2а-2г) – также толстая линия белого цвета) "выбирает" оптимальный путь с максимальными горизонтальными сдвиговыми напряжениями (изолинии белого цвета), вертикальные сдвиговые напряжения пренебрежимо малы. Конфигурация векторов горизонтальных смещений также свидетельствует об оптимальности направления миграции ЭГ-энергии.

На фрагменте рис. 1г треугольниками белого цвета обозначены вулканы, расположенные как раз в окрестности траектории миграции, что убедительно подтверждает связь между различными ЭГФП – сейсмическими и вулканическими. На фрагменте рис. 2г показано окончание траектории миграции ЭГ-энергии, идущей от первого землетрясения ко второму (его эпицентр обозначен на этом рисунке также окружностью белого цвета), а далее после этого эпицентра – траектория миграции сейсмической энергии, идущей от второго землетрясения в регион следующего, третьего землетрясения из их цепочки, имевшей место в модельном регионе. Таким образом, была смоделирована вся реальная цепочка, состоящая из нескольких десятков последовательных землетрясений.

### ***Выводы***

1. Важнейшими отличительными особенностями представленной модели, характеризующейся новизной и высокой приближенностью к описанию реальных условий протекания опасных ЭГП, являются: переменная толщина модельного пространства; учёт рельефа поверхности Мохо; пространственная вариативность упруго-вязких и плотностных характеристик земной коры; учёт кривизны поверхности планеты.

2. Авторами предпринята достаточно успешная попытка методами математического моделирования найти характеристики, которые позволяют выполнить прогнозные оценки пространственно-временных параметров ЭГП. Среди них – вертикальные и горизонтальные сдвиговые геодинамические напряжения.

3. Траектория миграции ЭГ-энергии проходит по тем областям, где располагаются участки концентрации максимальных горизонтальных и минимальных вертикальных сдвиговых напряжений. Она выстраивается как огибающая вдоль однонаправленно ориентированных векторов горизонтальных смещений в геологической среде.

4. С использованием разработанной математической модели возможно выявление участков геологической среды, на которых "поток" ЭГ-энергии с большой вероятностью переходит с одного глубинного уровня на другой. На таких участках наблюдается "циркуляция" векторов горизонтальных смещений в геологической среде, а также велики вертикальные сдвиговые напряжения.

#### Литература

1. Ананьин И.В., Фаддеев А.О., Сим Л.А. Тектонические напряжения в земной коре центральной части Восточно-Европейской платформы (по результатам математического моделирования и структурно-геоморфологическим данным) // В сб.: Проблемы сейсмичности Восточно-Европейской платформы. М.: изд. ОИФЗ РАН, 2000. С. 3-18.
2. Минаев В.А., Фаддеев А.О. Оценки геозкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М.: Финансы и статистика, изд. дом ИНФРА-М, 2009. 370 с.
3. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Данилов Р.М., Абрамова А.В., Павлова С.А. Математическое моделирование сейсмических рисков // Спецтехника и связь. 2013. № 5. С. 58-63.
4. 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.
5. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Бондарь К.М., Кузьменко Н.А., Невдах Т.М. Математические модели и программные средства оценки геодинамического риска // "Спецтехника и связь". 2015. № 6. С. 37-45.