

**В.А. Минаев<sup>1</sup>, А.О. Фаддеев<sup>2</sup>, М.П. Сычев<sup>3</sup>, Н.А. Кузьменко<sup>4</sup>, Т.М. Невдах<sup>2</sup>**  
(<sup>1</sup>Академия ГПС МЧС России, <sup>2</sup>Академия ФСИН России,  
<sup>3</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, <sup>4</sup>ЗАО "РТИ-Инвест"; e-mail: m1va@yandex.ru)

## **РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РИСКА ОПАСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПЛАТФОРМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

*Анализируются современные методы оценки состояния геологической среды территорий с целью прогнозирования опасных эндогенных геофизических процессов. Предлагается комплексная методика, учитывающая системный характер граничных условий и детальности информации при описании геодинамических напряжений и составляющих вектора смещений в геологической среде.*

*Ключевые слова: эндогенные геофизические процессы, платформенная территория, сейсмичность, риски, оценка, моделирование.*

**V.A. Minaev, A.O. Faddeev, M.P. Sychov, N.A. Kuzmenko, T.M. Nevdah**  
**CREATION OF COMPLEX METHOD OF DANGEROUS  
GEOPHYSICAL PROCESSES RISK ASSESSMENT  
ON PLATFORM TERRITORIES**

*It analyzed modern methods of geological environment assessment in order to predict dangerous endogenous geophysical processes. We propose the new integrated method that takes into account systemic nature of boundary conditions and detail information in description of geodynamic stresses and components of displacement vector in geological environment.*

*Key words: endogenous geophysical processes, platform territory, seismicity, risk, assessment, modeling.*

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

### **Введение**

К настоящему моменту времени разработан ряд математических оценки состояния геологической среды, которые с различным успехом используются на платформенных территориях для оценки риска опасных эндогенных процессов [2-9], особенно таких, как землетрясения и криповые подвижки (так называемые "ползучие" землетрясения). Однако основным недостатком существующих математических методов оценки состояния геологической среды является их ограничения по заданию краевых (граничных) условий. В то же время, названные условия настолько важны для методов оценки состояния геологической среды, что их незначительное изменение кардинальным образом меняет саму концепцию построения модели [2].

## Новый подход к построению комплексной методики оценки риска

Рассмотрим построение такой методики, в которой реализован новый подход к учёту граничных условий, с одной стороны, и подробная информация о состоянии среды, с другой стороны. В качестве подробной информации авторами использованы данные атласа "Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, обработанным в период с 1972 г. по 1995 г." [1] (эти профили далее будем называть геодезическими).

Наиболее информативным, с точки зрения решения поставленной задачи, является профиль Белозерск-Семёнов длиной 540 км, исследованный в ходе реализации проекта "РИФЕЙ" в 1992-1995 гг. [1]. Профиль Белозерск-Семёнов проходит с севера на юг по Московской синеклизе, располагаясь на территориях Вологодской, Ярославской, Костромской, Ивановской и Нижегородской областей.

Воспользовавшись соотношениями [2]

$$\begin{cases} V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}; \\ V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \end{cases} \quad (1)$$

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

$\rho$  – плотность геологической среды, оценим глубинное распределение прочностных параметров геологической среды вдоль всего рассматриваемого геодезического профиля:

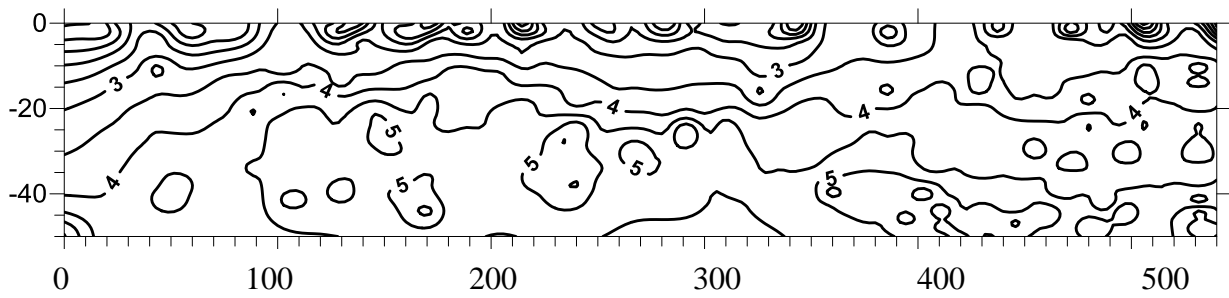
$$\begin{cases} V_s^2(x, z) = \frac{\mu(x, z)}{\rho(x, z)}; \\ V_p^2(x, z) = \frac{\lambda(x, z) + 2\mu(x, z)}{\rho(x, z)}. \end{cases} \quad (2)$$

Разрешая систему (2) относительно неизвестных функций  $\lambda(x, z)$  и  $\mu(x, z)$ , получим:

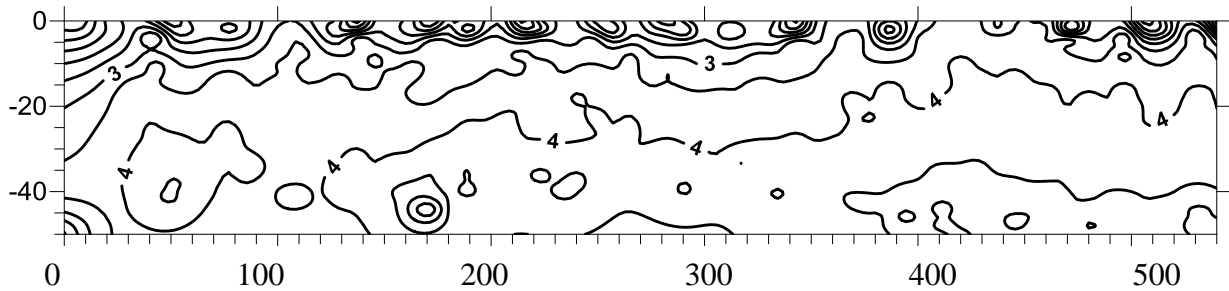
$$\begin{cases} \mu(x, z) = \rho(x, z)V_s^2(x, z); \\ \lambda(x, z) = \rho(x, z)(V_p^2(x, z) - 2V_s^2(x, z)). \end{cases} \quad (3)$$

На основании соотношений (3) можно построить поля распределений прочностных характеристик геологической среды вдоль геодезического профиля Белозерск-Семёнов (рис. 1, 2).

По оси абсцисс рис. 1 и последующих рисунков профилей цена деления составляет 10 км, по оси глубин (ось ординат) – 5 км.



**Рис. 1.** Распределение значений модуля упругости  $\lambda$  вдоль профиля Белозерск-Семёнов



**Рис. 2.** Распределение значений модуля сдвига  $\mu$  вдоль профиля Белозерск-Семёнов

Математическая зависимость включает следующую совокупность граничных условий, отраженных в соответствующих частных методиках.

В первой части методики учтём влияние аномалий гравитационного поля в изостатической редукции и распределение плотности геологической среды, при этом граничные условия представлены уравнениями следующего вида (для плоскости  $XZ$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_z^{(1)}(x, 0) = \rho_0(x)\Delta g_n(x)h; \\ \sigma_z^{(1)}(x, h) = 0; \\ \tau_{xz}^{(1)}(x, h) = 0; \\ \tau_{xz}^{(1)}(x, 0) = 0, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $\sigma_z^{(1)}, \tau_{xz}^{(1)}$  – вертикальные нормальные и сдвиговые геодинамические напряжения соответственно (верхний индекс указывает на номер составной части методики);

$\Delta g_n(x)$  – величина аномалии гравитационного поля в изостатической редукции вдоль профиля (вдоль горизонтальной оси  $X$ );

$h$  – толщина рассматриваемого слоя геологической среды;

$\rho_0(x)$  – величина плотности геологической среды вдоль профиля.

Величина  $\rho_0(x)$  рассчитывается следующим образом:

$$\rho_0(x) = \int_0^h \rho(x, z) dz, \quad (5)$$

где "0" соответствует нижней границе геодезического профиля (границе Мохоровичича);

"h" – верхней (дневной) поверхности рассматриваемого геологического слоя.

Во второй части методики учтём влияние на напряжённое состояние геологического слоя возмущений, возникающих на границе Мохо, обусловленных её конфигурацией, то есть её отклонениями от осреднённой глубины залегания границы Мохо:

$$\begin{cases} \sigma_z^{(2)}(x, h_1) = \rho_1(x)g\Delta h_1(x); \\ \sigma_z^{(2)}(x, h) = 0; \\ \tau_{xz}^{(2)}(x, h) = 0; \\ \tau_{xz}^{(2)}(x, h_1) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\sigma_z^{(2)}, \tau_{xz}^{(2)}$  – вертикальные нормальные и сдвиговые геодинамические напряжения соответственно;

$\Delta h_1(x)$  – величина отклонения границы Мохо от её осреднённого глубинного уровня вдоль профиля (вдоль горизонтальной оси X);

$h_1$  – осреднённая глубина залегания границы Мохо;

$\rho_1(x)$  – величина средней плотности геологической среды вдоль профиля в окрестности границы Мохо;

$g$  – ускорение свободного падения.

Величины  $\rho_1(x)$  и  $\Delta h_1(x)$  рассчитываются по формулам:

$$\rho_1(x) = \int_{H_M(x)}^h \rho(x, z) dz; \quad (7)$$

$$\Delta h_1(x) = H_M(x) - h_1, \quad (8)$$

где  $H_M(x)$  – глубины залегания границы Мохо вдоль профиля.

В третьей части методики отражён факт влияния на напряжённое состояние геологического слоя возмущений, определяемых неоднородностями кристаллического фундамента, то есть:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_z^{(3)}(x, h_2) = \rho_2(x)g\Delta h_2(x); \\ \sigma_z^{(3)}(x, h) = 0; \\ \tau_{xz}^{(3)}(x, h) = 0; \\ \tau_{xz}^{(3)}(x, 0) = 0, \end{array} \right. \quad (9)$$

где  $\sigma_z^{(3)}, \tau_{xz}^{(3)}$  – вертикальные нормальные и сдвиговые геодинамические напряжения соответственно;

$\Delta h_2(x)$  – величина отклонения верхней границы кристаллического фундамента от её осреднённого глубинного уровня вдоль профиля (вдоль горизонтальной оси X);

$h_2$  – осреднённая глубина залегания верхней границы кристаллического фундамента;

$\rho_2(x)$  – величина средней плотности геологической среды вдоль профиля в окрестности верхней границы кристаллического фундамента;

$g$  – ускорение свободного падения.

Величины  $\rho_2(x)$  и  $\Delta h_2(x)$  рассчитываются по формулам:

$$\rho_2(x) = \int_{H_K(x)}^{h_2} \rho(x, z) dz; \quad (10)$$

$$\Delta h_2(x) = H_K(x) - h_2, \quad (11)$$

где  $H_K(x)$  – глубины залегания верхней границы кристаллического фундамента вдоль профиля.

Для расчёта компонент тензора геодинамических напряжений и составляющих вектора смещений в геологической среде использовались их соотношения для двумерного случая [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x^{(i)}(x, z) = k^2 \left\{ \left[ k(B + Dz) + \frac{2\lambda + \mu}{\lambda + \mu} C \right] \cdot sh(kz) + \left[ k(A + Cz) + \frac{2\lambda + \mu}{\lambda + \mu} D \right] ch(kz) \right\} \cos kx, \\ \sigma_z^{(i)}(x, z) = k^2 \left\{ \left[ \frac{\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dz) \right] sh(kz) + \left[ \frac{\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Cz) \right] ch(kz) \right\} \cos kx, \\ \tau_{xz}^{(i)}(x, z) = k^2 \left\{ \left[ k(A + Cz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} D \right] sh(kz) + \left[ k(B + Dz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} C \right] ch(kz) \right\} \sin kx, \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\begin{cases} u_x^{(i)}(x, z) = \frac{k^2}{2\mu} \left\{ \left[ (B + Dz) + \frac{C}{k} \right] sh(kz) + \left[ (A + Cz) + \frac{D}{k} \right] ch(kz) \right\} \sin kx, \\ u_z^{(i)}(x, z) = -\frac{k^2}{2\mu} \left\{ \left[ (A + Cz) - \frac{2\mu}{k(\lambda + \mu)} D \right] sh(kz) + \left[ (B + Dz) - \frac{2\mu}{k(\lambda + \mu)} C \right] ch(kz) \right\} \cos kx, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\lambda, \mu$  – постоянные Ламе;

$A, B, C, D$  – неизвестные коэффициенты, зависящие от граничных условий;

$i = 1, 2, 3$  – порядковые номера частей методики.

Подставляя соотношения (12) в граничные условия (4), (6), (9), для коэффициентов всех частей методики были получены расчётные соотношения.

Для первой части методики получено:

$$\begin{cases} A^{(1)} = \frac{1}{k\Delta_1} (\gamma\alpha_1 + \delta\alpha_2); & B^{(1)} = \frac{\beta}{k\Delta_1}; \\ C^{(1)} = \frac{\gamma}{\Delta_1}; & D^{(1)} = \frac{\delta}{\Delta_1}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\alpha_1 = th(kh) - kh$ ;

$$\alpha_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - kh \cdot th(kh);$$

$$\gamma = \delta \left( kh - kh \cdot cth^2(kh) - \frac{1}{th(kh)} \right);$$

$$\beta = -\frac{\lambda}{\lambda + \mu} \gamma;$$

$$\begin{aligned} \Delta_1 = & kh \cdot sh(kh_1) - kh \cdot kh_1 \cdot ch(kh_1) - kh \cdot th(kh) \cdot ch(kh_1) + (kh)^2 \cdot ch(kh_1) - \\ & - kh \cdot cth^2(kh) \cdot sh(kh_1) + kh \cdot cth^2(kh) \cdot ch(kh_1) + kh \cdot cth^2(kh) \cdot th(kh) \cdot ch(kh_1) - \\ & - (kh)^2 \cdot cth^2(kh) \cdot ch(kh_1) - \frac{sh(kh_1) - kh_1 \cdot ch(kh_1) + kh \cdot ch(kh_1)}{th(kh)} + ch(kh_1) - \\ & - kh_1 \cdot sh(kh_1) + kh \cdot th(kh) \cdot ch(kh_1); \end{aligned}$$

$$\delta = \frac{\rho_1(x) g \Delta h_1^{(k)}(x)}{k^2};$$

$$k = \frac{\pi n}{L};$$

$n$  – порядковый номер гармоники;

$L$  – длина профиля.

Подобным же способом рассчитаны выражения коэффициентов для второй и третьей частей методики, которые имеют более сложный вид и поэтому в статье не приводятся. В основу расчётов положены преобразования Фурье, а сами расчёты выполнены по алгоритмам, реализованным в виде авторских компьютерных программ.

Подстановкой значений коэффициентов соответствующей методики в соотношения (12) и (13) рассчитаны поля напряжений и смещений для каждой методики и для всей комплексной методики в целом. При этом полагалось, что коэффициенты Ламе являются функциями от координат  $(x, z)$ .

Следующий вопрос – объединение всех частных методик в комплексную детерминированную методику оценки состояния геологической среды.

Идеальным с этой точки зрения является вариант, когда нам с абсолютной достоверностью известна вся информация: как по характеристикам геологической среды, так и по тем внешним воздействиям, которые на неё оказываются. В таком случае весовой вклад  $w_i$  каждой из методик при оценке состояния геологической среды будет одинаковым и равным  $w_i = 1/3$ . Однако не всегда вся информация известна, поэтому по одному или даже двум аспектам она может отсутствовать. В случае отсутствия данных по одной из частных методик весовые вклады  $w_i$  также одинаковы и равны  $w_i = 1/2$ . Однако в любом случае

должно быть выполнено условие  $\sum_{i=1}^n w_i = 1; \quad (i = 1, 2, 3)$ .

Кроме того, исходная информация о характеристиках геологической среды и о влиянии воздействий на эту среду может быть известна с различной степенью точности  $\varepsilon_{ij}$  ( $i$  – номер четвёрки условий;  $j$  – номер характеристики геологической среды или воздействия на нее из этого условия). Также будем полагать, что значения величины  $\varepsilon_{ij} \in [0; 1]$ .

При наличии всех трёх частных методик комплексное выражение, например, для компоненты сдвиговых напряжений  $\tau_{xz}$ , будет выглядеть следующим образом:

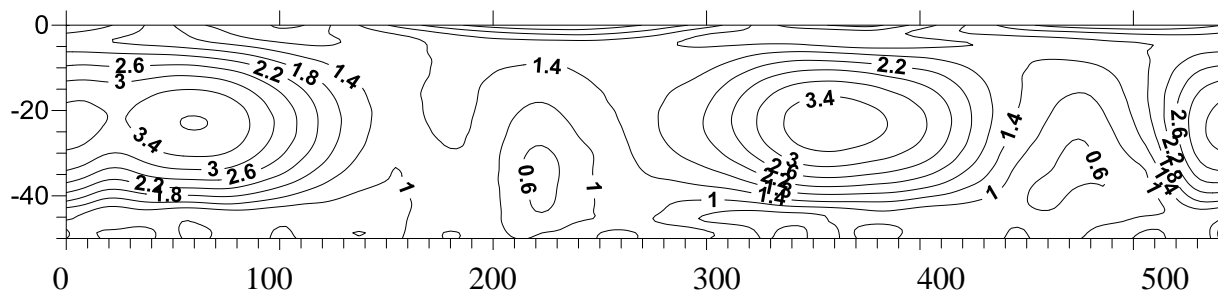
$$\tau_{xz} = w_1 \tau_{xz}^{(1)} \prod_{j=1}^2 \varepsilon_{1j} + w_2 \tau_{xz}^{(2)} \varepsilon_{21} + w_3 \tau_{xz}^{(3)} \prod_{j=1}^2 \varepsilon_{3j}. \quad (15)$$

Расчётные соотношения для остальных компонент тензора геодинамических напряжений и составляющих вектора смещений в геологической среде представляются аналогичным образом.

### Результаты математических расчётов

Рассмотрим результаты, полученные в ходе количественной реализации детерминированной комплексной математической методики оценки состояния геологической среды вдоль геодезического профиля Белозерск-Семёнов.

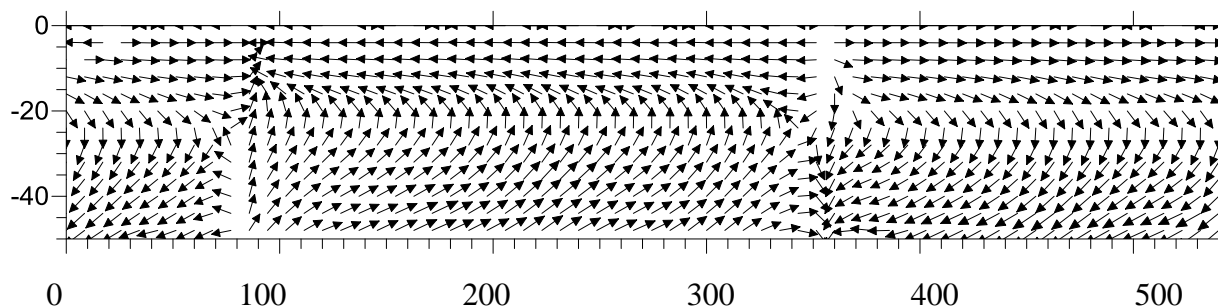
На рис. 3 представлены распределения сдвиговых напряжений смещений в геологической среде, рассчитанных по комплексной методике. При расчётах использовались осреднённые значения упругих модулей.



**Рис. 3.** Распределение сдвиговых напряжений вдоль профиля Белозерск-Семёнов, рассчитанные по комплексной методике. Сечение изолиний – 0,4 МПа

Как видно из рис. 3, ярко выражены два максимума напряжений: в начале профиля в интервале отметок "0"- "100" и в интервале отметок "300"- "400", что хорошо согласуется с реальными данными по проявлениям опасных геологических процессов в этих районах, особенно во втором случае ("300"- "400"), где профиль пересекает Горьковское водохранилище.

Отличия наблюдаются и на распределениях смещений в геологической среде (рис. 4). Очевидно, что параллельно с влиянием на геологическую среду аномального гравитационного поля накладывается воздействие неких процессов, протекающих в самой литосфере. Именно поэтому наблюдается своеобразный "сдвиг" поля векторов смещений к началу профиля.



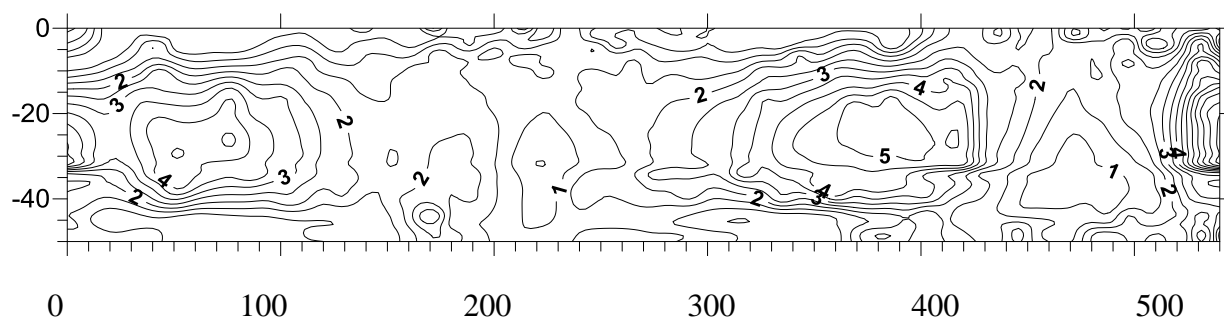
**Рис. 4.** Распределение смещений в геологической среде вдоль профиля Белозерск-Семёнов, рассчитанные по комплексной методике

Возможно, это обусловлено наличием в литосфере значительных горизонтальных сдвиговых процессов вдоль нарушений сплошности геологической среды, ослабленной сетью тектонических разломных структур. Вертикальные же тектонические процессы достаточно чётко фиксируются на этом профиле, что видно на рис. 3 и 4. Исследование подобных "сдвигов" на профилях позволяет отследить направление и характер особенностей тектонических процессов на платформенных территориях без проведения дорогостоящих приборных исследований с проведением взрывных работ.

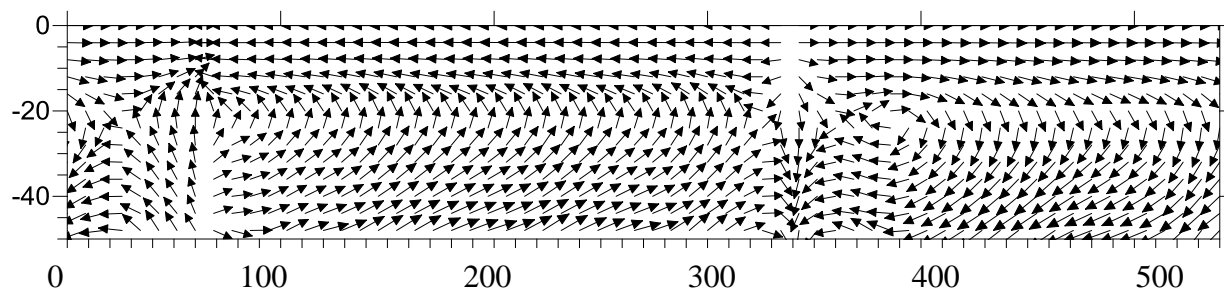


Более значительные изменения первоначальных структур полей сдвиговых напряжений и смещений в среде наблюдаются, если расчёты проводятся с учётом глубинного и латерального изменения упругих модулей – модуля  $\lambda$  и модуля сдвига  $\mu$  (рис. 5, 6).

Учёт вариаций упругих модулей вдоль профиля позволяет построить максимально приближенные к реальным распределения полей напряжений и смещений в геологической среде, что является важным фактором при разработке различных строительных и иных проектов на исследуемой территории.



**Рис. 5.** Распределение сдвиговых напряжений вдоль профиля Белозерск-Семёнов, рассчитанные по комплексной методике с учётом изменений упругих модулей. Сечение изолиний – 0,5 МПа



**Рис. 6.** Распределение смещений в геологической среде вдоль профиля Белозерск-Семёнов, рассчитанные по комплексной методике с учётом изменений упругих модулей

Если сопоставить смещения, представленные на рисунках, можно заметить появление на рис. 6 своеобразной вихревой структуры, оказывающей значительное влияние на напряжённое состояние в этом районе. На рис. 6 этой структуре как раз соответствуют повышенные значения сдвиговых напряжений, что нельзя также не принимать в расчёт при проведении работ в указанном районе профиля Белозерск-Семёнов.

## Выводы

1. Разработана качественно новая комплексная детерминированная методика оценки состояния геологической среды вдоль геодезического профиля, учитывающая, в отличие от традиционно используемых методик, более подробную и разнообразную информацию о геологической среде;
2. Методика на основе системы граничных условий позволяет получить более достоверные оценки и распределения напряжений и смещений, что имеет большое прогнозное значение при разработке различных строительных и иных проектов;
3. Учёт вариаций упругих модулей в глубинном и латеральном направлениях даёт возможность выявлять и исследовать особенности тектонических процессов, протекающих в земной коре платформенных территорий.

## Литература

1. *Атлас* "Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год". ФГУП "ВСЕГЕИ". Зарегистрирован в НТЦ "Информрегистр" в виде электронного издания (Регистрационное свидетельство № 34141 от 14 февраля 2014 г.). Размещен на сайте Роснедр в разделе "Информационное обеспечение ГРР".
2. **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.
3. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** "Медленные" катастрофы, здоровье и безопасность населения // Матер. 15-й науч.-техн. конференции "Системы безопасности – 2006". М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. С. 14-17.
4. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** Математические методы и модели в геоэкологическом районировании рекреационных территорий // Матер. региональной науч.-практ. конф. "Математические методы и информационные технологии в современном обществе". Рязань: Академия ФСИН РФ, 2007. С. 111-117.
5. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** Безопасность и отдых: системный взгляд на проблему рисков // Труды II междунар. науч.-практ. конф. "Туризм и рекреация: фундаментальные исследования". М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007. С. 329-334.
6. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** Моделирование геоэкологических рисков и оценка геоэкологической безопасности на рекреационных территориях // Проблемы управления рисками в техносфере. 2008. Т. 8. № 4. С. 69-76.
7. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** Моделирование геоэкологического риска // Спецтехника и связь. 2009. № 2. С. 24-30.
8. **Минаев В.А., Фаддеев А.О., Данилов Р. М.** Математическое моделирование рисков геодинамического происхождения // Спецтехника и связь. 2011. № 1. С. 48-52.
9. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** Методика оценки геоэкологического риска и геоэкологической безопасности ландшафтно-территориальных комплексов // Матер. 17-й науч.-техн. конференции "Системы безопасности – 2008". М.: Академия ГПС МЧС России, 2008. С. 96-102.