

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУКТУР В НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОСРЕДАХ

Осипова Е.Б.

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток
osipov@poi.dvo.ru*

Геодинамические явления в неоднородной 3D-геосреде рассматриваем как деформационные процессы, которые характеризуются полями перемещений, поворотов и деформаций. Количественные и пространственные характеристики распределения этих полей обеспечиваются соответствующими полями напряжений. Напряженность и соответствующее гравитационное поле, обусловленное плотностной неоднородностью Земли, является одним из основных внутренних источников возникновения тектонических напряжений [1]. Гравитационное поле обеспечивает формирование соответствующего усложненного деформирования геосреды, состоящего из перемещений, сдвигов и поворотов текущих точек по всем координатным направлениям.

Механико-математическое моделирование напряженно-деформированного состояния неоднородных геосред основано на теории подобия реологических процессов в неоднородных многослойных средах, подверженных конечным деформациям [2–3]. В 3D-постановке теории конечных деформаций и линеаризованной теории устойчивости предложена единая модель для изучения возможных дислокаций в неоднородных геосредах. Напряженно-деформированное состояние (НДС) разделяется на основное и возмущенное [4]. Возможность существования основного (невозмущенного) состояния с пренебрежимо малыми напряжениями и деформациями, которое существует до начала действия внутренних сил, действующих в земной коре, и обусловлено пренебрежимо малым гравитационным полем, является гипотетическим предположением. Кинематика возмущенного состояния определяется компонентами тензора конечных деформаций Коши-Грина t_{ij} , поступательными перемещениями и перемещениями линейного поворота, напряжен-

ное состояние - компонентами несимметричного тензора напряжений Пиола-Кирхгофа t_{ij} . Аналитический алгоритм основан на получении решений относительно параметров, имеющих физический и геометрический смысл. Предложенная методика позволяет на этапе численно-графического анализа построить неоднородное распределение физико-механических свойств, конкретизировать граничные условия, уравнение состояния, количественно и качественно оценить порядок нелинейности параметров, вклад каждой компоненты в распределение результирующих полей напряженно-деформированного состояния. Выбор уравнения состояния и входных данных параметров плотности, упругости и жесткости согласно модели Земли РЕМ-О определяется геофизическим обоснованием данных [5]. Рассматриваем любой вертикальный (горизонтальный) геопрофиль как 2D-фрагмент 3D-шара, каждая точка которого имеет текущие координаты: глубина, широта, долгота. Полученное общее решение задачи устойчивого равновесия в аналитической форме, предполагает возможность встраивания параметра плотности $\rho \pm \Delta \rho$ модели [6]. Вклад осадков и водного слоя, стратификация распределения плотностей по глубине профилей в расчетах компонент и интенсивности напряжений учитывается фактическими значениями заданного поля плотностей. По входным данным плотностных моделей выполнен детальный расчет, характеризующий НДС двух профилей 1,1–1,8 и 2,1–2,10 [7, 6], расположенных в квадрате: $45.0^\circ \div 50.0^\circ$ с.ш., $149.0^\circ \div 156.0^\circ$ в.д. региона Центральных Курил (рис. 1). На рисунках 2 и 3а показаны графики изолиний и градиентного распределения интенсивности напряжений по плоскости профилей 1,1–1,8 и 2,1–2,10, которые согласуются с положением глубинных разломов и плотностных границ слоев [7, 6]. На рисунке 3б приведен график изолиний удельной энергии деформации по профилю 2,1–2,10.

Обобщение компонентного анализа расчетных НДС по профилям позволило определить общие свойства состояния всего квадрата $45.0^\circ \div 50.0^\circ$ с.ш., $149.0^\circ \div 156.0^\circ$ в.д. [9,10]:

1. Перемещения в радиальном направлении являются бесконечно малыми величинами $|u_\rho| \ll 1$, значит, в результате деформирования мощность слоев в квадрате остается практически без изменения. Поступательные перемещения по глубине обусловлены компонентами u_φ и u_λ в латераль-

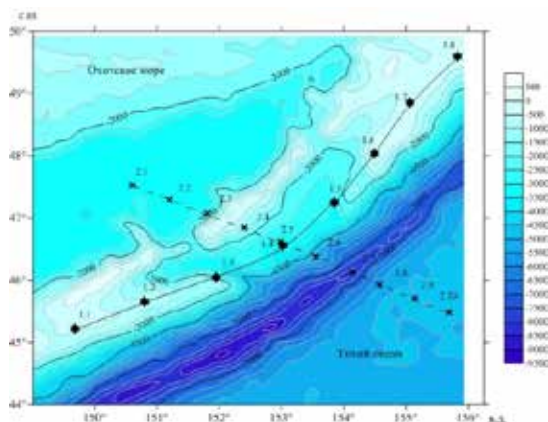


Рис. 1. Расположение профилей 1,1–1,8 и 2,1–2,10 в квадрате $149.0^{\circ} \div 156.0^{\circ}$ в.д., $45.0^{\circ} \div 50.0^{\circ}$ с.ш. Цифровая модель рельефа построена по данным <http://topex.ucsd.edu> [8].

ных направлениях, при этом преобладают широтные компоненты перемещений.

2. Компоненты линейных поворотов в результате перемещений фиксируются во всех координатных направлениях (отсутствуют нулевые значения), их порядок соизмерим со значениями компонент деформаций.
3. Компоненты тензора деформаций Коши-Грина полностью характеризуют деформацию среды в окрестности текущей точки в результате перемещений, линейных поворотов, косвенно определяя значения деформационных удлинений и сдвигов и как результат соответствующие изменения раз-

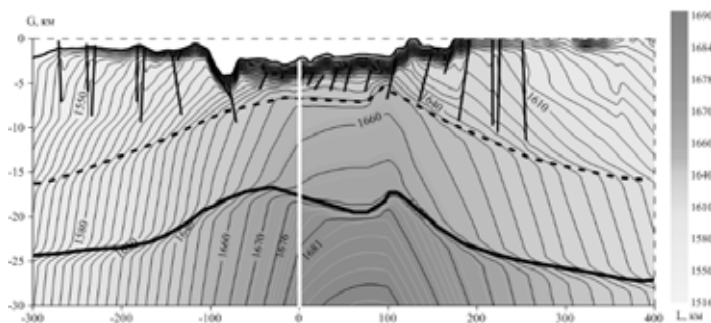


Рис. 2. Распределение изолиний и градиентного поля интенсивности напряжений по профилю 1,1–1,8 (зона растяжения). Пересечение профилей 1,1–1,8 и 2,1–2,10 обозначено белой сплошной линией

- меров и формы. Положительным линейным деформациям $\varepsilon_{(\rho\rho)}$ соответствуют удлинения, а отрицательным $\varepsilon_{(\varphi\varphi)}$ и $\varepsilon_{(\lambda\lambda)}$ - укорочения.
- Компоненты несимметричного тензора напряжений Пиола-Кирхгофа полностью обеспечивают кинематику. Интенсивность напряжений - это результирующий параметр тензора напряжений Пиола-Кирхгофа. Чем больше значение параметра интенсивности напряжений в определенном направлении, тем более вероятно относительное усиление движения и сопутствующее деформирование: перемещение $|u_\rho| \ll 1$ определяет большую жесткость в радиальном направлении, угол поворота w_φ определяет большую сопротивляемость деформации при повороте в плоскости $O_{\rho\lambda}$, деформация $\varepsilon_{(\rho\rho)} \ll 1$ определяет большую прочность и способность выдерживать нагрузки в радиальном направлении.
 - На основании алгоритма главных напряжений по данным расчетов текущих значений компонент тензора напряже-

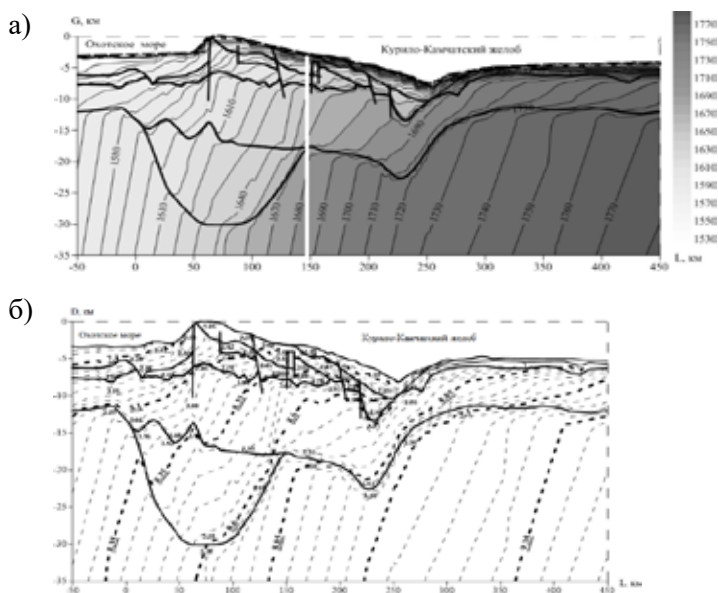


Рис. 3. Распределение изолиний и градиентного поля интенсивности напряжений (а) и изолиний удельной энергии деформации (б) по профилю 2.1–2.10 (зона сжатия)

ний Пиола-Кирхгофа по двум профилям, получена общая характеристика напряженного состояния всего квадрата: растяжение на фоне преобладающего сжатия (максимальное растяжение $\sigma_I > 0$, сжатие $\sigma_{II} < 0$, максимальное сжатие $\sigma_{III} < 0$).

Применение результирующего параметра интенсивности напряжений позволило выявить особенности распределения полей напряжений по профилям.

Установлены следующие особенности НДС по профилю 1,1–1,8 (рис. 2): рельеф поверхности профиля определяется НДС глубинных структур; пространственное распределение изолиний интенсивности напряжений моделирует положение профиля в зоне растяжения; на глубине ниже 20 км на протяжении $-40 \text{ км} < L < 200 \text{ км}$ моделируется часть океанической плиты профиля 2,1–2,10.

Установлены следующие особенности НДС по профилю 2,1–2,10 (рис. 3а,б): пространственное распределение изолиний интенсивности напряжений и удельной энергии деформации моделирует потенциальную возможность бокового давления со стороны Тихоокеанской плиты, создающей зону сжатия и повышенных напряжений. По мере удаления в сторону Охотского моря, величина интенсивности напряжений и удельной энергии деформации уменьшается; рельеф поверхности профиля определяется НДС глубинных структур.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 124022100082-4.

Литература

1. Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В. Роль силы гравитации в формировании глубинной структуры сдвиговых зон // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. N 1. С. 45-68.
2. Гзовский М.В. Метод моделирования в тектонофизике // Советская геология. 1958. N 4. С. 53 – 72.
3. Новожиллов В.В. Основы нелинейной теории упругости. - М.; Л.: Гостехиздат, 1948. 211 с.
4. Гузь А.Н. Основы теории упругой устойчивости деформируемых тел. - Киев: Вища школа, 1986. - 511 с.
5. Dziewonski A.M., Hales A.L., Lapwood E.R. Parametrically simple Earth models consistent with geophysical data // Phys. Earth Planet. Inter. 1975. V.10. No. 1. P. 12-48.

6. Кулинич Р.Г., Валитов М.Г., Прошкина З.Н. Сравнительный анализ сейсмических и плотностных моделей земной коры Центральных Курил // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. N 6. С. 45-56.
7. Прошкина З.Н. О глубинном строении зоны разрушения хребта Витязя (Центральные Курилы) // Вестник ДВО РАН. 2016. N5. С. 36-42.
8. Цифровая модель рельефа (Satellite Geodesy, Global Topography) [Электрон. ресурс]. URL: <http://topex.ucsd.edu> (дата обращения 02.06.2023 г.)
9. Осипова Е.Б. Численная реконструкция напряженно-деформированного состояния в земной коре // Вычислительные технологии. 2023. Т. 28. № 5. С. 15-32. DOI:10.25743/ICT.2023.28.5.003.
10. Осипова Е.Б. Геомеханические маркеры напряженно-деформированного состояния и взаимодействия структур в неоднородных геосредах // Прикладная математика и механика. 2024. Т. 88. № 5. С. 778-796. DOI: 10.31857/S0032823524050096 EDN: JPHQQO.