Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.248.2,551.89

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.339-345

3D-моделирование эффекта гидроизостазии с близкой к реальной конфигурацией поверхности Мохо для Охотского моря

© 2021 Р. Ф. Булгаков

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Резюме. Взаимосвязь между деформациями твердой поверхности Земли и изменениями уровня Мирового океана при смене ледниковых периодов межледниковьями изучается методами численного моделирования. При деформациях земной поверхности ожидается, что амплитуда деформаций будет зависеть от меняющейся по поверхности Земли мощности верхнего литосферного слоя. Учесть изменение мощности литосферного слоя возможно с применением 3D-моделирования. В данной работе выполнено 3D-моделирования явления гидроизостазии при морской трансгрессии, схожей с трансгрессиями межледниковий для Охотского моря. Сетка (mesh) построена на основе близкой к реальной батиметрии Охотского моря и конфигурации поверхности Мохо. Моделирование выполнено методом конечных элементов в программном пакете Elmer. В результате установлена связь между конфигурацией поверхности границы Мохо и амплитудой деформаций.

Ключевые слова: послеледниковая трансгрессия, вязкость мантии, гидроизостазия, вертикальные движения, Elmer, метод конечных элементов

3D modeling of the hydroisostasy effect with a configuration of Moho surface of the Sea of Okhotsk close to real

Rustam F. Bulgakov

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Abstract. Interrelation between global sea level changes during Glacial–Interglacial periods and Earth surface deformations is studied using digital simulation methods. During Earth surface deformations, the deformation amplitude is expected to depend on variable thickness of the upper lithospheric layer. 3D modeling allows to take into account thickness variation of the lithospheric layer. In this work, 3D modeling of hydroisostasy under marine transgression similar to Interglacial ones for the Sea of Okhotsk has been made with creating a mesh on the base close to real bathimetry of the Sea of Okhotsk and Moho surface configuration. Simulation has been done by finite element method by Elmer software suite. As a result, relation between Moho surface configuration and Earth surface deformation was found.

Keywords: postglacial transgression, mantle viscosity, hydroisostasy, vertical movements, Elmer, finite element method

Для цитирования: Булгаков Р.Ф. 3D-моделирование эффекта гидроизостазии с близкой к реальной конфигурацией поверхности Мохо для Охотского моря. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 4, с. 339–345. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.339-345

Благодарности

Автор выражает администраторам сайта "Elmer Discussion Forum" (http://www.elmerfem.org/forum/ viewforum.php?f=3) и его участникам искреннюю благодарность за методическую помощь по использованию программного пакета Elmer.

For citation: Bulgakov R.F. 3D modeling of the hydroisostasy effect with a configuration of Moho surface of the Sea of Okhotsk close to real. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 339–345. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.339-345

Acknowledgements

Author gratefully acknowledges the admins of Elmer Discussion Forum website (http://www.elmerfem. org/forum/viewforum.php?f=3) and its participants for the methodological assistance in using the Elmer software suite.

Введение

Изменения уровня океана в четвертичное время, вызванные формированием покровных ледников, достигали амплитуды в 120–130 м, что приводило к перераспределению нагрузки водной толщи на дно океанов и морей. Перераспределение водной нагрузки деформировало земную поверхность. Деформации земной поверхности вследствие изменения водной нагрузки известны как явление гидроизостазии. Деформации в результате гидроизостазии могут иметь заметные значения, до первых метров. В земных недрах они могут достигать нижней мантии.

Распределение деформаций, а следовательно, и поля напряжения, нужно ожидать, зависит от анизотропии реологических свойств мантийных слоев и мощности литосферы, имеющей свойства упругой «скорлупы» по отношению к мантии с вязко-упругими свойствами.

Изучение деформаций земной поверхности в результате меняющейся нагрузки ведется методами численного моделирования начиная с работ [Farell, Clark, 1976; Clark, Lingle, 1979; Peltier, 1974; и др.]. При этом, в силу планетарного масштаба явления и необходимости учета перераспределения водных масс, замерзающих или, наоборот, высвобождающихся из ледников, вращения планеты, гравитации, модель для расчета должна включать весь объем планеты. Для такой модели сложно учесть локальные неоднородности строения литосферы и мантийных слоев, поэтому обычно они принимаются однородными и с одинаковой мощностью для всей планеты. Нужно отметить, что появились работы с использованием метода конечных элементов (МКЭ), в которых учитываются вязкостные неоднородности в мантии для сферической формы Земли [Bartholet et al., 2021], но работ с учетом реальной топографии границы литосферы и мантии пока нет.

Однако при построении модели для ограниченного участка земной поверхности современных знаний о строении земных недр и современных, среднего уровня, вычислительных возможностей достаточно, чтобы учесть при моделировании неоднородности строения недр. Опыт моделирования явления гидроизостазии МКЭ был предварительно получен на 2D-модели [Булгаков, 2021].

В данной работе делается попытка построить трехмерную модель с учетом реальной батиметрии дна Охотского моря и реальной поверхности границы Мохо; моделировать деформации при нагружении по линейному закону в течение 17 000 лет дна водной толщей глубиной 120 м и затем, после мгновенного удаления нагрузки, моделировать релаксацию объема в течение 61 000 лет.

Модель для расчета

Для моделирования на основе данных батиметрии Торех (https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/ get_data.cgi) и границы Мохо из базы данных Crust 2.0 (https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2. html), адаптированных для охотоморского региона [Сеначин и др., 2013], была построена 3D-сетка (mesh) для расчета методом конечных элементов (МКЭ). Участок охотоморского региона был выбран в пределах координат 135°–165° в.д. и 42°–64° с.ш. (рис. 1).

Построение сетки (рис. 2) выполнялось В программных пакетах с открытым кодом и открытым доступом Salome (https:// salome-platform.org/) и FreeCAD (https://www. freecadweb.org/). Батиметрия и граница Мохо были взяты в проекции Меркатора с параметрами: нулевой меридиан 147° в.д., смещение от нулевого меридиана 16 345 951.83 м, от экватора 5 306 124.4959 м. Сетка представляет собой параллелепипед со сторонами по 50 000 км и глубиной 2891 км до границы земного ядра. В центральной части сетки – поверхности, построенные на основе данных о батиметрии и поверхности границы Мохо. Разрешение грида цифровой модели поверхностей взято 50 км. Избыточный объем был построен по сторонам куба центральной части для устранения влияния взаимодействия с боковыми границами модели. Центральная часть параллелепипеда представляет собой квадрат со сторонами по 2500 км (рис. 2). Моделирование в данном случае имеет некоторую аналогию с работой [Steffen et al., 2006], где для расчета также была построена 3D-сетка в виде параллелограмма со сторонами 130 000 км и высотой 2886 км. Но там для построения сетки использовались не реальная земная поверхность и поверхность Мохо, а плоские поверхности.

Сетка строилась в Salome после подготовки геометрии поверхностей батиметрии и границы Мохо в FreeCAD. В Salome для генерирования сетки использовалась опция "Gmsh" из известного программного продукта Gmsh (http://gmsh.info/), специально разработанного для генерирования мешей для анализа МКЭ. Элементы для сетки были выбраны quadratic tetrahedrals. Сетка содержит 678 923 узла и 128 493 элемента. Для достижения реального времени для расчета и уменьшения количества элементов сетки в сторону краев от центральной



Рис. 1. (а) Карта-схема Тихого океана. Полигон указывает расположение участка, взятого для моделирования. (b) Карта-схема района Охотского моря, ограниченного границами полигона.

Fig. 1. (a) Pacific Ocean sketch-map. A polygon shows the location of modeling area. (b) The Sea of Okhotsk sketch-map inside the polygon boundaries.



Рис. 2. (а) 3D-сетка, построенная для моделирования; (b) центральная часть 3D-сетки; (c) поверхность границы Мохо, использованная для построения 3D-сетки; (d) вид с южной стороны через центральную часть сетки: внизу поверхность Мохо, выше поверхность дна Охотского моря.

Fig. 2. (a) 3D mesh, used for modeling; (b) Central part of 3D mesh; (c) Moho surface used in 3D mesh constructing; (d) South view across the central part of the mesh: bottom of the view is Moho surface, top of the view is the Sea of Okhotsk bottom bathymetry.

| Слой | Радиус, км | Мощность слоя, км | Плотность, кг/м ³ | Коэфф. Пуассона | Модуль сдвига, ×10 ¹¹ Па | Вязкость, Па·с | Гравитация (ускорение свободного падения), м/с ² |
|----------------|------------|----------------------|---------------------------------|--------------------|---|----------------------|---|
| Литосфера | 6371–6321 | 7–50 | 2854.6 | 0.27 | 0.45 | 1.0×10^{44} | 9.82 |
| Верхняя мантия | 6321–6151 | 170 | 3367.12 | 0.27 | 0.85 | 0.5×10^{21} | 9.505 |
| | 6151–5971 | 180 | 3467.12 | 0.3 | 2.19 | 0.5×10^{21} | 9.505 |
| | 5971-5701 | 270 | 3988.07 | 0.3 | 2.29 | 2.7×10^{21} | 9.505 |
| Нижняя мантия | 5701-3480 | 2221 | 4396.56 | 0.49 | 6.5844 | 2.7×10^{21} | 9.37 |

Таблица. Характеристики литосферы и мантии, принятые в работе для модели *Table.* Lithosphere and mantle characteristics taken for model simulation

части, а также по мере увеличения глубины размеры элементов сетки были увеличены.

Модель сетки была составлена из 5 слоев (см. таблицу).

Расчет

Расчет выполнялся в программном пакете с открытым кодом и в свободном доступе Elmer (https://www.csc.fi/web/elmer). Моделирование происходило в режиме течения времени (transient), временной шаг был установлен – 10 лет. Моделировали возрастание нагрузки на дно Охотского моря по линейному закону в течение 17 000 лет, симулируя поступление воды с повышением глубины моря на 120 м, затем мгновенное снятие нагрузки, после которого в течение 61 000 лет наблюдалась релаксация объема. Максвелловская среда мантийных слоев была принята несжимаемой. Для литосферы было установлено «запредельное» значение динамической вязкости 10⁴⁴ Па·с, что определяло поведение материала литосферы как упругого тела. При моделировании использовался предусмотренный в программном пакете математический инструментарий. Решение системы линейных уравнений деформации выполнялось итерациями обобщенного метода минимальных невязок (GCR) после применения предобуславливателей неполной факторизации Крылова (ILU2). Для дискретизации во времени использовался метод BDF (формула обратной дифференциации) второго порядка, обобщенный метод минимальных невязок (http://www.nic.funet.fi/pub/sci/physics/elmer/doc/ ElmerSolverManual.pdf). Все границы параллелепипеда модели, кроме верхней, были закреплены как неподвижные. Предел сходимости итераций был установлен 10⁻⁵, что позволяет оценить ошибку в значении полученных деформаций менее 1 см. Количество итераций расчета для каждого временного шага начиналось от 2500 и в процессе вычисления падало до 140. Время счета на машине AMD Ryzen7 2700 eightcore processor ×16 Memory 32GB заняло 48 ч.

Результаты и обсуждение

Целью 3D-моделирования являлась оценка вертикальных деформаций при нагружении земных недр в модели, построенной с учетом конфигурации реальной поверхности границы Мохо. Нагружение морского дна происходило линейно возрастающей нагрузкой, симулирующей увеличивающуюся в результате поступления талой воды из покровных ледников в межледниковые периоды толщу воды. Астеносферный слой не учитывался. На рис. 3 показано пространственное распределение деформаций, полученных после нагружения дна моря увеличивающейся по линейному закону



Рис. 3. Распределение положительных и отрицательных деформаций после нагружения 120-метровым слоем воды поверхности дна Охотского моря.

Fig. 3. Positive and negative deformation distribution after loading the Sea of Okhotsk bottom with 120 meters of water layer.

толщей воды в течение 17 000 лет до глубины 120 м. На рис. 4 показаны разрезы по профилям, указанным на рис. 3.

На фоне положительных деформаций (растяжения) участков суши и отрицательных (сжатия) для морского дна выделяются наи-



большие по амплитуде отрицательные деформации: Центрально-Охотского поднятия и района шельфа северной части Охотского моря, зал. Шелихова и впадины Тинро, центральных частей Японского моря и Курильской (Южно-Охотской) впадины – и наибольшие по амплитуде положительные деформации: прол. Невельского, северо-запада Сахалина, части Приамурья, центральной части Камчатки и района севернее г. Магадан (рис. 1 b). Любопытно, что положительные деформации района прол. Невельского были также получены ранее в работе, посвященной связи гидроизостазии с четвертичными вертикальными движениями о. Сахалин [Булгаков, Сеначин, 2019].

Предварительно выявилась следующая особенность распределения деформаций по поверхности, судя по разрезам, приведенным на рис. 4: амплитуды деформаций, оказалось, коррелируют не только с мощностью литосферы, но и с размером площади без значительных и резких изменений глубины.



Рис. 4. Поперечные профили (расположение их указано на рис. 3). **Fig. 4.** Cross-sections (see for location in Fig. 3).

В отношении распределения во времени и пространстве максимальных отрицательных (рис. 5 а) и максимальных положительных (рис. 5 b) деформаций оказалось, что в начале нагружения максимум отрицательных деформаций смещался с северо-охотского шельфа в зал. Шелихова и обратно, а положительных – с прол. Невельского на Центральную Камчатку, но через несколько тысяч лет максимум и минимум деформаций перестают менять свое положение.

Обращают на себя внимание следующие особенности распределения положительных и отрицательных деформаций вдоль береговой зоны (рис. 3). Побережье Приморья испытывает погружение. Любопытно, что перед этим аналогичные результаты были получены нами ранее в работе, посвященной связи вертикальных тектонических движений Приморья с гидроизостазией [Булгаков и др., 2020]. Побережье устья р. Амур в районе расположения Шантарских островов испытывает положительные деформации. Хотя далее на северо-восток вдоль побережья до зал. Шелихова в пределах береговой линии преобладают нисходящие движения.

В распределении положительных и отрицательных деформаций во времени интерес-

50

60

тыс. лет (kv)

90

80

70

о<mark>м (m)</mark>

10

20

30

40

ны следующие особенности. Отрицательные максимальные деформации не успели полностью релаксировать к состоянию до нагружения даже после 60 000 лет без нагрузки водной толщи, что соизмеримо с длительностью ледниковых периодов. Положительные максимальные деформации при релаксировании смещаются с Центральной Камчатки на прол. Невельского и обратно, тогда как отрицательные мигрируют между зал. Шелихова и североохотским шельфом.

Заключение

3D-моделирование методом конечных элементов (МКЭ) с учетом реальной поверхности границы Мохо при нагружении водной толщей, сопоставимой с водной толщей, высвобождаемой в межледниковья плейстоцена, показало сложную зависимость деформаций от конфигурации поверхности Мохо. Релаксация во времени упругой литосферы и вязкоупругой мантии после полного снятия нагрузки оказалась продолжительной и соизмеримой по длительности, например, с последним ледниковым периодом. Это позволяет допустить, что в ледниковые периоды остаточные гидроизостатические деформации морского дна и прилегающей суши продолжались.

Программный пакет Elmer показал свою пригодность для решения геофизических задач.



Рис. 5. Изменение максимальных отрицательных деформаций (дно Охотского моря) (а) и максимально положительных деформаций (окружающая суша) (b) во времени – нагружение увеличивающейся по линейному закону толщей водного слоя от 0 до 120 м в течение 17 000 лет и последующая релаксация после мгновенного полного снятия нагрузки водной толщи в продолжение 61 000 лет.

Fig. 5. (a) Variation of maximal negative deformations (the Sea of Okhotsk bottom) and (b) variation of maximal positive deformation (surround land) in time under loading with a linearly increasing water layer from 0 to 120 meters during 17 ky and following relaxation after instantaneous complete removing of water load during 61 ky.

Список литературы

1. Булгаков Р.Ф. **2021.** Опыт численного моделирования гидроизостазии методом конечных элементов. *Геоинформатика*, 2: 26–32. doi:10.47148/1609-364X-2021-2-26-32

2. Булгаков Р.Ф., Сеначин В.Н. **2019.** Морские террасы и влияние эффекта гидроизостазии на вертикальные движения Сахалина. *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 277–286. doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286

3. Булгаков Р.Ф., Афанасьев В.В., Игнатов Е.И. **2020.** Гидроизостазия как фактор, повлиявший на ход послеледниковой трансгрессии на шельфе и побережье Приморья, по результатам численного моделирования. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 210–219. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.210-219.220-229

4. Сеначин В.Н., Веселов О.В., Семакин В.П., Кочергин Е.В. **2013.** Цифровая модель земной коры Охотоморского региона. *Геоинформатика*, 4: 33–44.

5. Bartholet A., Milne G.A., Latychev K. **2021.** Modelling sea-level fingerprints of glaciated regions with low mantle viscosity. *Earth System Dynamics*, 12: 783–795. https://doi.org/10.5194/esd-12-783-2021

6. Clark J.A., Lingle C.S. **1979.** Predicted relative sea-level changes (18,000 years b.p. to Present) caused by late-glacial retreat of the Antarctic ice sheet. *Quaternary Research*, 11(3): 279–298. https://doi.org/10.1016/0033-5894(79)90076-0

7. Farrel W.E., Clark J.A. **1976.** On postglacial sea level. *Geophysical J. of the Royal Astronomical Society*, 46(3): 647–667. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1976.tb01252.x

8. Peltier W.R. **1974.** The impulse response of Maxwell Earth. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 12(4): 649–669. https://doi.org/10.1029/rg012i004p00649

9. Steffen H., Kaufmann G., Wu P. **2006.** Three-dimensional finite-element modeling of the glacial isostatic adjusment in Fennoscandia. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(1–2): 358–375. doi:10.1016/j.epsl.2006.08.003

References

1. Bulgakov R.F. **2021.** Digital simulation trial of hydroisostasy by finite element method. *Geoinformatika*, 2: 26–32. (In Russ.). doi:10.47148/1609-364X-2021-2-26-32

2. Bulgakov R.F., Senachin V.N. **2019.** Marine terraces and hydroisostasy influence on the vertical movements of the Sakhalin. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 3(3): 277–286. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286

3. Bulgakov R.F., Afanas' ev V.V., Ignatov E.I. **2020.** Effect of hydroisostasy on postglacial transgression on the shelf and coast of Primorye as revealed by computer modelling. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 210–219. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.210-219.220-229

4. Senachin V.N., Veselov O.V., Semakin V.P., Kochergin E.V. **2013.** Digital model of the earth's crust of the Okhotsk Sea region. *Geoinformatika*, 4: 33–44. (In Russ.).

5. Bartholet A., Milne G.A., Latychev K. **2021.** Modelling sea-level fingerprints of glaciated regions with low mantle viscosity. *Earth System Dynamics*, 12: 783–795. https://doi.org/10.5194/esd-12-783-2021

6. Clark J.A., Lingle C.S. **1979.** Predicted relative sea-level changes (18,000 years b.p. to Present) caused by late-glacial retreat of the Antarctic ice sheet. *Quaternary Research*, 11(3): 279–298. https://doi.org/10.1016/0033-5894(79)90076-0

7. Farrel W.E., Clark J.A. **1976.** On postglacial sea level. *Geophysical J. of the Royal Astronomical Society*, 46(3): 647–667. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1976.tb01252.x

8. Peltier W.R. **1974.** The impulse response of Maxwell Earth. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 12(4): 649–669. https://doi.org/10.1029/rg012i004p00649

9. Steffen H., Kaufmann G., Wu P. **2006.** Three-dimensional finite-element modeling of the glacial isostatic adjusment in Fennoscandia. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(1–2): 358–375. doi:10.1016/j.epsl.2006.08.003

Об авторе

БУЛГАКОВ Рустям Фаридович (https://orcid.org/0000-0001-9095-3785), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, r.bulgakov@imgg.ru

About the Author

BULGAKOV Rustyam F. (https://orcid.org/0000-0001-9095-3785), Cand. of Sci. (Geography), Senior Researcher of Laboratory of coastal geosystems, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, r.bulgakov@imgg.ru