

Опыт численного моделирования гидроизостазии методом конечных элементов

© 2021 г. — Р.Ф. Булгаков

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

Поступила 13.04.2021 г.

Принята к печати 01.06.2021 г.

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

Аннотация: Гидроизостазия как геодинамический феномен была открыта при изучении изменений уровня Мирового океана в результате забора воды в покровные ледники в эпохи оледенений и возврата ее в океан в эпохи межледниковий. Изменения водной нагрузки на морское дно при изменениях уровня моря влияли на изменения формы твердой поверхности Земли и вносили свой вклад в вертикальные движения земной коры в прибрежных районах. Вертикальные движения в береговой зоне критичны для прогноза затоплений или, наоборот, осушений при проектировании и эксплуатации долговременных сооружений береговой инфраструктуры.

Основным методом изучения гидроизостазии остается численное моделирование. Глобальный характер явления обуславливает моделирование с вовлечением всего объема планеты, а детальный учет особенностей строения литосферы и мантийных слоев в каждом регионе вынуждает использовать трехмерные модели с высоким разрешением, что требует больших вычислительных ресурсов.

Метод конечных элементов (МКЭ), в силу возможности задавать граничные условия позволяет использовать локально-региональные модели и тем самым учитывать региональные особенности строения литосферы и мантийных слоев с достаточным разрешением и использовать трехмерные модели, не привлекая больших вычислительных ресурсов.

Одним из доступных программных пакетов с возможностью использования МКЭ в геодинамических расчетах является Elmer — пакет с открытым кодом и открытым доступом, разрабатываемый и поддерживаемый финским научно-исследовательским институтом CSC — IT CENTER FOR SCIENCE LTD.

В данной работе описано опытное применение пакета Elmer для моделирования гидроизостазии для условий, похожих на условия в районе впадины Дерюгина в Охотском море. Получены правдоподобные и обнадеживающие результаты, которые обосновывают применение пакета Elmer для продолжения исследований на более детальном уровне.

Для цитирования: Булгаков Р.Ф. Опыт численного моделирования гидроизостазии методом конечных элементов // Геоинформатика. – 2021. – № 2. – С. 26–32. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-2-26-32.

Digital simulation trial of hydroisostasy by finite element method

© 2021 г. — R.F. Bulgakov

Institute Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzno-Sakhalinsk, Russia, r.bulgakov@imgg.ru

Resieved 13.04.2021

Accepted for publication 01.06.2021

Key words: *postglacial transgression, mantle viscosity, hydroisostasy, vertical movements, Elmer, finite element method.*

Abstract: Hydroisostasy as a geodynamic phenomenon was discovered along investigation sea level changes of the World Ocean as result of intakes water to glaciers during Glacial period and releasing back during Interglacials. The water loads under sea level changes influenced the change of solid Earth shape and make the contribution to the vertical Earth crust movement along shorelines areas. A vertical shorelines movements are critical issue of the longtime living infrastructure coast facilities design with the overflowing and overdrainage forecast.

The main method of hydroisostasy phenomenon investigation is remain the digital simulation. The global character of phenomenon require simulation involving all planet volume and detail accounting of the lithosphere and mantle layers features for each region which is forced to use 3-D modeling with high resolution and require big computing resources.

Finite element method with ability to assign boundary conditions allow to use local-regions models with enough resolutions and take into accounts local lithosphere and mantle features without involving big computing resources.

One of the free software packs with open code and possibility applying FEM for geodynamics simulations is — ELMER, software designed and supported by Finland CSC — IT CENTER FOR SCIENCE LTD.

The trial applying of ELMER software packs for modeling hydroisostasy phenomenon for Earth interior conditions close to Deryugin depression in Okhotsk sea in this study has done. A plausible and encouraging result obtained for continuation of research in more detail.

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

Введение

Формирование покровных ледников в плейстоцене и последующие их деградации с изменениями уровня Мирового океана в диапазоне 100–130 метров вызывали изменения нагрузки на поверхность Земли, определяющие ее деформации, известные как вертикальные движения, вследствие эффекта гляциоизостазии и гидроизостазии. Если последствия эффекта гляциоизостазии известны давно и изучаются широким кругом специалистов, то гидростазия привлекает меньше внимания исследователей просто в силу меньшей амплитуды сопровождающих тектонических и геоморфологических процессов. Однако сам эффект гидроизостазии проявляется и, судя по всему, вносит вклад в современную геодинамическую ситуацию, особенно вблизи морских водоемов.

В данной работе тестируется программный пакет Elmer для проверки предположения о нарушении геодинамических балансов в результате позднеплейстоценовых изменений уровня Мирового океана. Программный пакет Elmer разработан для моделирования методом конечных элементов (МКЭ).

В качестве прототипа модели был выбран участок впадины Дерюгина в Охотском море, наиболее глубоководную часть которой можно аппроксимировать окружностью диаметром около 110 км.

Численное моделирование гидроизостазии

Палеогеографические исследования изменений уровня Мирового океана за послеледниковое время предопределили интерес к изучению напряженного состояния в земной коре и мантии, вызванного гляциоизостатическими, а впоследствии и гидроизостатическими нагрузками. В результате предпринятых усилий по изучению напряженного состояния в земной коре и мантии при пространственно-временном изменении нагрузки на земную поверхность от воздействия возникающих и деградирующих покровных оледенений и связанных с этим изменений уровня моря было обосновано использование вязко-упругой среды Максвелла [6] при расчетах этих процессов. Позже на основе этой работы был предложен метод решения «уравнения уровня моря», получивший в дальнейшем название «псевдоспектральный» [5].

Следующей краеугольной работой среди исследований деформаций земной поверхности в результате эволюции глобальных покровных оледенений и эвстатических колебаний уровня Мирового океана в постледниковье стала работа [3]. В этой работе было установлено, что деформации земной поверхности и изменения уровня моря в результате таяния покровных ледников не одинаковы по поверхности Земли, а для получения адекватных результатов расчета необходимо дальнейшее уточнение палеогеографических данных с реконструкциями высотных

значений голоценовых и послеледниковых уровней моря и дальнейшее совершенствование реологической модели Земли.

Для охотоморского региона, на примере о. Сахалин, анализ влияния эффекта гидроизостазии на вертикальные движения был выполнен в работе [1].

В данной работе авторы положительно оценили вклад эффекта гидроизостазии на вертикальные движения о. Сахалин по результатам моделирования с решением «уравнения уровня моря» в программе SELEN–2.9 [11, 12, 13] и оценкой изменений изостатической нагрузки после падения уровня моря в период ледниковья.

Следует отметить, что расчеты, выполняемые в перечисленных выше работах, использовали «осесимметричную» модель Земли с включением в модель всего объема планеты. При таком подходе крайне усложняется построение моделей с реальными границами литосферы, земной коры и учет реальной анизотропии мантийных слоев.

Применение метода конечных элементов (МКЭ) позволяет использовать модель с разрешением, достаточно высоким для решения региональных проблем, а также в полной мере учитывать латеральную анизотропию мантийных слоев и вариации глубины литосферы в границах выбранного для изучения региона. Актуальность применения МКЭ для описания изменений напряженного состояния земных недр в результате изменений пространственно-временной нагрузки на поверхности была представлена в работе [7].

В настоящее время пионером среди программных продуктов с открытым кодом, которые предназначены для моделирования физических процессов методом МКЭ, включившим в свой арсенал моделирование вязко-упругой среды Максвелла, является программный пакет ELMER [8;14]. Следует отметить, что авторы протестировали и сравнили результаты моделирования, выполненных в пакете Elmer, с аналогичными расчетами, выполненными в других программах, разработанных для геодинамического моделирования. Результаты, полученные в пакете Elmer, сравнили с результатами, полученными в коммерческом пакете ABAQUS [4] и программном пакете с открытым кодом и открытым доступом TABOO, специально предназначенном для расчетов эффекта гляциоизостазии [9; 10]. Сравнение результатов показало хорошее сходжение, открывающее дорогу для применения пакета ELMER для расчетов геодинамических процессов [14].

Выполненные расчеты и обсуждение результатов

Для опытного моделирования МКЭ был адаптирован и использован программный скрипт из библиотек тестов пакета Elmer «elmer_earth_2d_2layer», предназначенный для расчета гляциоизостатической релаксации земной коры после снятия лед-

никовой нагрузки в двумерном варианте модели. В тестовом скрипте ведется расчет для двухслойной модели, состоящей из литосферы мощностью 120 км и подлежащей верхней мантии мощностью 280 км. На поверхность литосферы внезапно начинает давить 100-метровый слой льда радиусом 30 км на протяжении 20 лет, затем, столь же внезапно, давление прекращается, и в течение 20 лет происходит вязко-эластичное восстановление деформаций после снятия нагрузки. Максимальные отрицательные вертикальные деформации на поверхности литосферы по истечении 20 лет при этих заданных нагрузках в тестовом моделировании достигают — 1,4 м.

Для оценки вертикальных деформаций, приближенных к реальным условиям района Охотского моря, в скрипте были изменены заданные параметры расчета. Так как целью моделирования была имитация послеледниковой трансгрессии Мирового Океана, в результате которой уровень с отметок от -100 до -130 м за 16 тыс. лет поднялся до современного, то для расчета была задана глубина водного слоя, которая изменялась по линейному закону от 0 до 120 м в течение 16 тыс. лет, а затем на протяжении 14 тыс. лет сохраняла неизменное значение 120 м. Таким образом, наблюдались деформации продолжительностью 4 тыс. лет, имитирующие состояние водного слоя к настоящему времени, и их развитие в будущем на протяжении еще 10 тыс. лет.

Радиус поверхности нагружения водной толщей был увеличен до 55 км, что симулировало площадь дна впадины Дерюгина в Охотском море, нагружаемое водной толщей с изменяющейся глубиной. Для большего сходства модели с реальностью строение земной коры и мантии также были уподоблены тем, которые имеют место во впадине Дерюгина [2]. Двумерный меш (сетка) с двумя слоями из тестового оригинала был преобразован в пятислойный с реологическими характеристиками, как показано в Таблице 1.

Табл. 1.

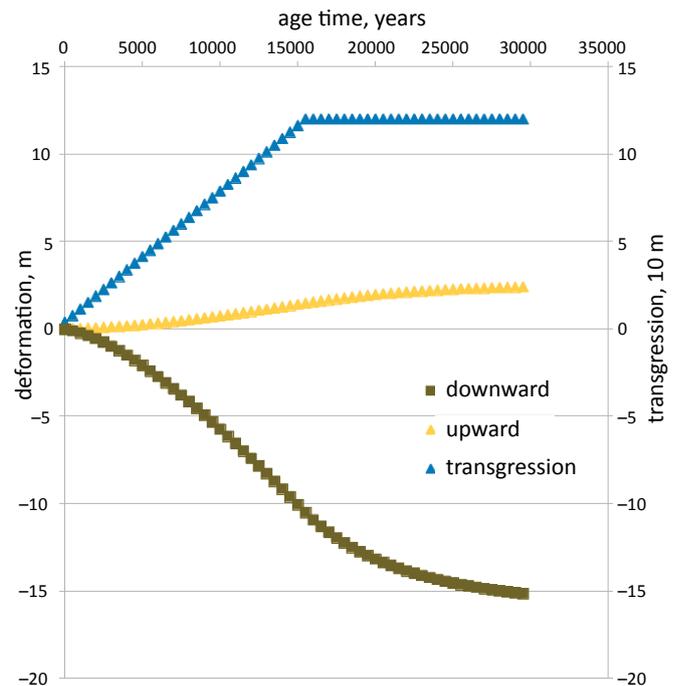
Tab. 1.

Слой	Радиус, км	Мощность слоя, км	Плотность, кг/м ³	Кoeff. Пуассона	Модуль сдвига, ×10 ¹¹ Па	Вязкость, Па·с	Гравитация (ускорение свободного падения), м/с ²
Литосфера	6371–6321	50	3233,6	0,49	0,45	1,0×1044	9,82
Верхняя мантия	6321–6151	170	3988,065	0,49	0,85	0,5×1021	9,82
	6151–5971	180	3988,065	0,49	0,85	0,5×1021	9,87556
	5971–5701	270	3988,065	0,49	0,85	0,5×1021	9,83999
Нижняя мантия	5701–3480	2221	4396,56	0,49	2,19	2,7×1021	9,79211

В результате расчетов (рис. 1) при заданных характеристиках оказалось, что после 16-тысячелетней трансгрессии на твердой поверхности литосферы в пределах нагружаемой водным слоем площадки образовались отрицательные де-

Рис. 1. Максимальные деформации вызванные изменением уровня моря — трансгрессией на протяжении 16 тыс. лет и стабильного положения уровня моря на протяжении следующих 14 тыс. лет

Fig. 1. Maximal deformation initiated by sea level change — transgression during 16 ky and then by stabilised sea level during 14 ky

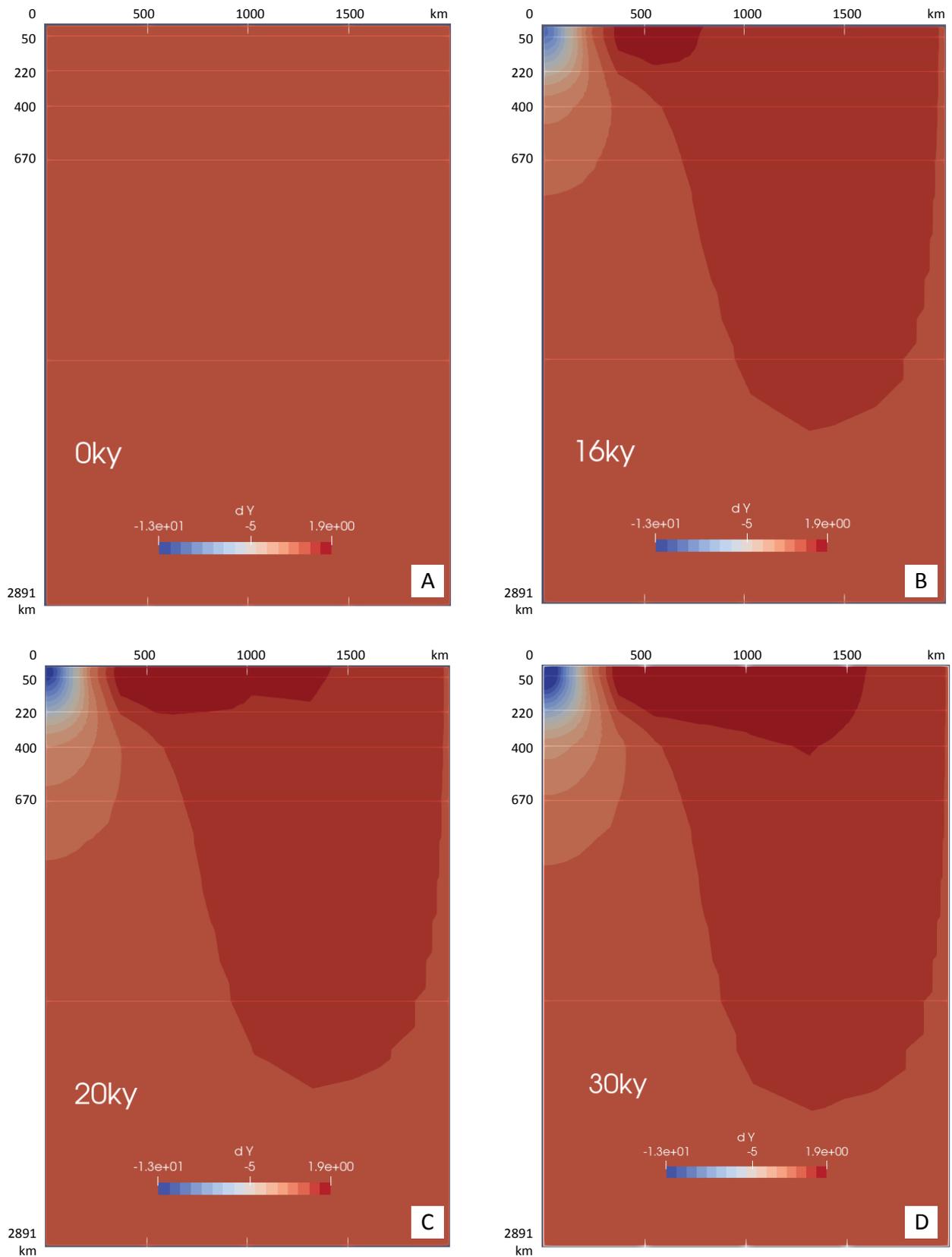


Значения “downward” — максимальные отрицательные деформации под нагружаемой площадкой. Значения “upward” — максимальные положительные деформации на смежных участках за пределами нагружаемого участка. Значения “transgression” — ход подъема уровня моря во времени, шкала дана в 10-ках метров.

“Downward” meaning — maximal negative deformations under loaded area. “Upward” meaning — maximal positive deformations at the adjacent area. “Transgression” meaning — water level increasing in time scale, units done in 10 meters.

Рис. 2. Распределение деформаций по разрезу за разные временные отрезки в ходе подъема уровня водного слоя: А — 0 лет; В — за 16 тыс. лет; С — за 20 тыс. лет; D — за 30 тыс. лет. Шкала деформаций дана в метрах

Fig. 2. The cross section of deformation distribution for different time duration by water level rise: A — 0 years; B — 16 ky; C — 20 ky; D — 30 ky. Scale given in meters



формации амплитудой — 10,5 м, а на расстоянии около 500 км (северо-восточное побережье Охотского моря) — положительные деформации амплитудой +1,4 м. По истечении 20 тыс. лет (16 тыс. лет + 4 тыс. лет, 4 тыс. лет назад прекратилась деградация ледникового щита Антарктиды), когда на протяжении 4 тыс. лет уровень моря не изменялся, отрицательные деформации продолжали увеличиваться, но с меньшей скоростью и достигли — 13 м, а положительные заметно увеличились по простиранию (рис. 2 С) и достигли +1,9 м.

Следует отметить распространение деформаций по профилю на глубину. Деформации, как с отрицательными, так и с положительными значениями, проникли на всю глубину верхней мантии и прошли даже в нижнюю (рис. 2 В, С, D).

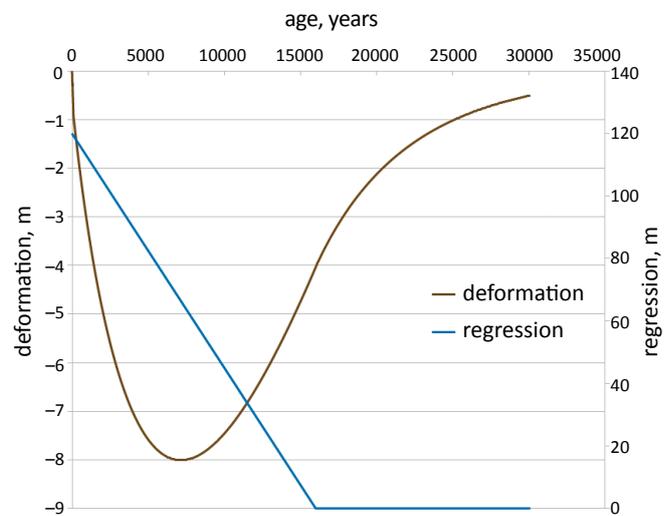
При замене эластичного слоя литосферы на вязко-эластичный значение отрицательной амплитуды деформации увеличились еще сильнее.

При выполнении моделирования в «обратном направлении», с одномоментным нагружением площадки, плавным снятием нагрузки в продолжение 16 тыс. лет и дальнейшим наблюдением за восстановлением деформированной среды без нагрузки на протяжении еще 14 тыс. лет (рис. 3), выяснилось, что после одномоментного нагружения площадки 120-метровым водным слоем начались отрицательные деформации, которые увеличивались до тех пор, пока слой воды не уменьшился со 120 м до 66,7 м за 7100 лет. Далее по мере уменьшения глубины воды до 0 м на протяжении 8900 лет восстановление после деформаций продолжалось и по асимптоте стремилось к полному восстановлению, но так и не смогло достичь 0, хотя расчет продолжался еще 14 тыс. лет после полного снятия нагрузки. Т.е. отрицательные деформации на поверхности земной коры не успевали вернуться к значениям до деформирования. Это наводит на мысль, что отрицательно деформированные побережья в результате гидроизостатического нагружения продолжают вертикальные движения и не успели еще вернуться в состояние равновесия.

Следует оговорить, что данная модель учитывает только реологические свойства мантии и литосферы, не учитывает центробежные силы вращения планеты и не учитывает в полной мере уравновешивающие и удерживающие сфероподобную форму планеты гравитационные силы всего объема. Поэтому амплитуды расчетных деформаций должны быть завышены, но тем не менее эффектно демонстрируют фактор времени. На отрезке времени, соизмеримом с послеледниковьем, расчет показывает, что изменение уровня воды Мирового океана на 120 м на протяжении 16 тыс. лет приводит к заметным деформациям поверхности планеты, что интуитивно кажется невозможным. Вообще, исходя из

Рис. 3. Изменение максимальных деформаций в ходе снижения уровня слоя воды

Fig. 3. Variation of maximal deformations during water level decreasing



Значения «deformation» — ход изменений максимальных деформаций под площадкой нагруженной снижающим уровень водным слоем. Значения «regression» — ход снижения уровня водного слоя во времени

"Deformation" meaning — maximal deformations under loaded area by decreasing water level. "Regression" meaning — water level decreasing rate

свойств вязкостной модели при более длительном нагружении, геометрия модели должна полностью разрушиться при отсутствии других удерживающих геометрию сил.

Заключение

Полученные результаты тестового геодинамического моделирования методом конечных элементов (МКЭ) в программном пакет Elmer дают обнадеживающие результаты по применимости пакета для специализированных тематических расчетов с учетом реологических свойств мантии и литосферы. Даже первые результаты наглядно демонстрируют интуитивно непривычные результаты: нагрузка от тяжести 120-метрового слой воды за несколько тысячелетий вызывает деформации глубоко в мантийных слоях и смежных участках на земной поверхности на сотни и тысячи километров. Очевидно, что эти деформации вносят свой вклад в развитие прибрежных зон, и их следует учитывать при прогнозах изменений уровня Мирового океана вследствие климатических изменений. Также напрашивается вопрос о влиянии остаточного, напряженно-деформированного состояния земной коры в результате гидроизостатических явлений на современные сейсмические процессы.

Автор выражает искреннюю благодарность Томасу Цвингеру (Thomas Zwinger) за помощь в работе с программным пакетом Elmer.

Литература

1. Булгаков Р.Ф., Сеначин В.Н. Морские террасы и влияние эффекта гидроизостазии на вертикальные движения Сахалина // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3. – № 3. – С. 277–286. DOI:10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286.
2. Родников А.Г., Сергеева Н.А., Забаринская Л.П. Глубинное строение впадины Дерюгина (Охотское море) // Тихоокеанская геология. – 2002. – Т. 21. – № 4. – С. 3–8.
3. Clark J.A., Farrell W.E., Peltier W.R. Global Changes in Postglacial Sea Level: A Numerical Calculation // *Quaternary Research*. – 1978. – Vol. 9. – Iss. 3. – pp. 265–287. DOI: 10.1016/0033-5894(78)90033-9.
4. *Getting Started with Abaqus/CAE* [Электронный ресурс]. – Dassault Systèmes, 2016. – Режим доступа: <http://130.149.89.49:2080/v2016/books/gsa/default.htm> (дата обращения: 29.04.2021).
5. Mitrovica J.X., Peltier W.R. On post-glacial geoid subsidence over the equatorial oceans // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1991. – Vol. 96. – Iss. B12. – pp. 20053–20071. DOI: 10.1029/91JB01284.
6. Peltier W.R. The Impulse Response of a Maxwell Earth // *Reviews of Geophysics*. – 1974. – Vol. 12. – Iss. 4. – P. 649–669. DOI: 10.1029/RG012i004p00649.
7. Peltier W.R., Farrel W.E., Clark J.A. Glacial isostasy and relative sea-level: A global finite element model // *Tectonophysics*. – 1978. – Vol. 50. – Iss. 2–3. – pp. 81–110. DOI: 10.1016/0040-1951(78)90129-4.
8. Råback P., Malinen M., Ruokolainen J., Pursula A., Zwinger T. Elmer Models Manual [Электронный ресурс]. – Espoo : CSC – IT Center for Science, 2019. – Режим доступа: <http://www.nic.funet.fi/pub/sci/physics/elmer/doc/ElmerModelsManual.pdf> (дата обращения: 05.03.2020).
9. Spada G. The theory behind TABOO [Электронный ресурс]. – Golden : Samizdat Press, 2003. – 108 p. – Режим доступа: <https://github.com/danielemelini/TABOO/blob/master/DOC/TABOO-theory.pdf> (дата обращения: 05.03.2020).
10. Spada G., Antonioli A., Boschi L., Brandi V., Cianetti S., Galvani G., Giunchi C., Perniola B., Piana Agostinetti N., Piersanti A., Stocchi P. TABOO, User Guide. – Golden : Samizdat Press, 2004. – 120 p. – Режим доступа: https://github.com/danielemelini/TABOO/blob/master/DOC/TABOO_User_Guide.pdf (дата обращения: 05.03.2020).
11. Spada G., Melini D., Galassi G., Colleoni F. Modeling sea level changes and geodetic variations by glacial isostasy: the improved SELEN code [Электронный ресурс] // arXiv:1212.5061 [physics.geo-ph]. – 2012. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/1212.5061> (дата обращения: 22.04.2021).
12. Spada G., Stocchi P. SELEN: A Fortran 90 program for solving the “sea-level equation” // *Computers & Geosciences*. – 2007. – Vol. 33. – Iss. 4. – pp. 538–562. DOI:10.1016/j.cageo.2006.08.006.
13. Spada G., Stocchi P. The sea level equation, theory and numerical examples. – Roma : Aracne, 2006. – 96 p.
14. Zwinger T., Nield A.G., Ruokolainen J., King M.A. A new open-source viscoelastic solid earth deformation module implemented in Elmer (v8.4) // *Geoscientific Model Development*. – 2020. – Vol. 13. – Iss. 3. – pp. 1155–1164. DOI: 10.5194/gmd-13-1155-2020.

References

1. Bulgakov R.F., Senachin V.N. Marine terraces and hydroisostasy influence on the vertical movements of the Sakhalin. *Geosystems of Transition Zones*. 2019;3(3):277–286. DOI:10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286 [in Russian].
2. Rodnikov A.G., Sergeyeva N.A., Zabarinskaya L.P. The deep structure of the Deryugin basin (Sea of Okhotsk). *Geology of the Pacific Ocean*. 2002;21(4):3–8 [in Russian].
3. Clark J.A., Farrell W.E., Peltier W.R. Global Changes in Postglacial Sea Level: A Numerical Calculation. *Quaternary Research*. 1978;9(3):265–287. DOI: 10.1016/0033-5894(78)90033-9.
4. *Getting Started with Abaqus/CAE*. Dassault Systèmes, 2016. Available at: <http://130.149.89.49:2080/v2016/books/gsa/default.htm> (accessed 29.04.2021).
5. Mitrovica J.X., Peltier W.R. On post-glacial geoid subsidence over the equatorial oceans. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1991;96(B12):20053–20071. DOI: 10.1029/91JB01284.
6. Peltier W.R. The Impulse Response of a Maxwell Earth. *Reviews of Geophysics*. 1974;12(4):649–669. DOI: 10.1029/RG012i004p00649.
7. Peltier W.R., Farrel W.E., Clark J.A. Glacial isostasy and relative sea-level: A global finite element model. *Tectonophysics*. 1978;50(2–3):81–110. DOI: 10.1016/0040-1951(78)90129-4.
8. Råback P., Malinen M., Ruokolainen J., Pursula A., Zwinger T. Elmer Models Manual. Espoo: CSC – IT Center for Science; 2019. – Available at: <http://www.nic.funet.fi/pub/sci/physics/elmer/doc/ElmerModelsManual.pdf> (accessed 05.03.2020).
9. Spada G. The theory behind TABOO. Golden: Samizdat Press; 2003. 108 p. Available at: <https://github.com/danielemelini/TABOO/blob/master/DOC/TABOO-theory.pdf> (accessed: 05.03.2020).
10. Spada G., Antonioli A., Boschi L., Brandi V., Cianetti S., Galvani G., Giunchi C., Perniola B., Piana Agostinetti N., Piersanti A., Stocchi P. TABOO, User Guide. Golden: Samizdat Press; 2004. 120 p. Available at: https://github.com/danielemelini/TABOO/blob/master/DOC/TABOO_User_Guide.pdf (accessed 05.03.2020).
11. Spada G., Melini D., Galassi G., Colleoni F. Modeling sea level changes and geodetic variations by glacial isostasy: the improved SELEN code. arXiv:1212.5061 [physics.geo-ph]. 2012. Available at: <http://arxiv.org/abs/1212.5061> (accessed 22.04.2021).
12. Spada G., Stocchi P. SELEN: A Fortran 90 program for solving the “sea-level equation”. *Computers & Geosciences*. 2007;33(4):538–562. DOI:10.1016/j.cageo.2006.08.006.

13. *Spada G., Stocchi P.* The sea level equation, theory and numerical examples. Roma: Aracne; 2006. 96 p.
14. *Zwinger T., Niell A.G., Ruokolainen J., King M.A.* A new open-source viscoelastic solid earth deformation module implemented in Elmer (v8.4). *Geoscientific Model Development*. 2020;13(3):1155–1164. DOI: 10.5194/gmd-13-1155-2020.

Информация об авторе

Булгаков Рустям Фаридович

Кандидат географических наук,
научный сотрудник лаборатории береговых геосистем

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
(ИМГИГ ДВО РАН)

693022, Южно-Сахалинск, ул.Науки д.1Б

e-mail: r.bulgakov@imgg.ru

ORCID 0000-0001-9095-3785

Information about author

Rustam F. Bulgakov

Candidate of Geographic Sciences,
Researcher Laboratory of Coastal Geosystems

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS,

1B, Nauka str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia

e-mail: r.bulgakov@imgg.ru

ORCID 0000-0001-9095-3785