

© Авторы 2022 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2022. Open access.
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.2022.6.2.124-129>
<https://www.elibrary.ru/pdeywh>

Моделирование вертикальных смещений в результате мантийной конвекции на профиле через Охотское море

Р. Ф. Булгаков

E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Реферат. Вертикальные движения, особенно в районах активных материковых окраин, таких как Курило-Камчатская переходная зона, плохо изучены. Одним из факторов, существенно влияющих на амплитуду и направление вертикальных движений в переходных зонах, является мантийная конвекция. Путем численного моделирования мантийной конвекции, выполненного методом конечных элементов, получены оценки значений вертикальных подвижек в регионе. При принятых скоростях мантийной конвекции от 1 до 5 мм/год получены значения воздыманий района о. Сахалин и Курильской гряды от 0–3 до 13 м. Полученные результаты следует учитывать при реконструкциях неотектонической истории региона и оценках геодинамической ситуации региона Охотского моря.

Ключевые слова: мантийная конвекция, Охотоморской регион, вертикальные движения, метод конечных элементов, граница Мохо

Vertical motion modeling as a result of mantle convection on the Sea of Okhotsk profile

Rustam F. Bulgakov

E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. Vertical motions, especially in the active continental margins such as Kuril-Kamchatka transition zone, are still pure studied. One of the factors significantly affecting the amplitudes and directions of vertical motions is mantle convections. Estimates of the amplitudes of vertical motions in region have been obtained by means of numerical modeling of the mantle convection made by the method of finite elements. The values of emergences in the area of Sakhalin Island and the Kuril Ridge from 0–3 to 13 m were obtained with the accepted rates of mantle convection from 1 to 5 mm/year. The results obtained should be taken into account when reconstructing neotectonic history of the region and assessing the geodynamic situation in the region of the Sea of Okhotsk.

Keywords: mantle convection, region of the Sea of Okhotsk, vertical motions, method of finite elements, Moho discontinuity

Для цитирования: Булгаков Р.Ф. Моделирование вертикальных смещений в результате мантийной конвекции на профиле через Охотское море. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 2, с. 124–129. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.124-129>; <https://www.elibrary.ru/pdeywh>

For citation: Bulgakov R.F. Vertical motion modeling as a result of mantle convection on the Sea of Okhotsk profile. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 124–129. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.124-129>; <https://www.elibrary.ru/pdeywh>

Введение

Расчетам мантийной конвекции посвящены классические работы известных отечественных специалистов – А.П. Трубицына, Н.Л. Добрецова, А.Г. Кирдяшкина (см., например, [1]). В них решаются глобальные проблемы термодинамики конвекции; объясняются планетарные геологические особенности формирования

Земли. Настоящая работа представляет собой попытку решить частную, локальную задачу – определить вклад конвекции в вертикальные движения в Охотоморском регионе.

Мантийная конвекция в непосредственной близости к зоне субдукции, где мантийный поток упирается в погружающуюся плиту, вызывает кроме горизонтальных перемещений

еще и вертикальные смещения. При этом среди факторов, слагающих суммарный эффект вертикальных неотектонических движений, включая эффекты гидроизостазии, вклад от мантийной конвекции в районах активных континентальных окраин (таких как Курило-Камчатская зона субдукции) может иметь решающее значение.

Менее изученной стороной вклада мантийной конвекции в вертикальные смещения для зон субдукции островодужного типа является задуговая область, в то время как на изучении динамики преддуговой области концентрируется основное внимание.

Для оценки вклада конвекции в вертикальные движения и сопоставления этих оценочных значений с амплитудой вертикальных движений, обусловленных эффектом гидроизостазии, в данной работе предпринята попытка выполнить численное моделирование мантийной конвекции в задуговой области района субдукции островодужного типа в условиях близких к условиям района Охотского моря – Курильских островов.

Модель

Для выполнения моделирования мантийной конвекции и ее вклада в амплитуду вертикальных движений была построена 2D-сетка (mesh) (рис. 1) слоя литосферы и мантийных слоев до глубины 1080 км. Литосферный слой построен с использованием реального топо-

графо-батиметрического профиля земной поверхности на основе данных батиметрии Topex (https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi) и реальной границы Мохо из базы данных Crust 2.0 (<https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>). Параметры поверхности погружающейся плиты взяты из работ [1, 2].

Построение сетки (рис. 1) выполнялось в программных пакетах с открытым кодом и открытым доступом: Salome (<https://salome-platform.org/>) и FreeCAD (<https://www.freecadweb.org/>).

Модель строилась для двух слоев мантии: примерно 300-километровый слой, в котором происходит течение мантийного вещества, что соответствует оценкам в работе [1], и подлежащий неподвижный слой до глубины 1080 км. Протяженность модели 2120 км, профиль А–В пересекает Охотское море от континентальной части в районе хр. Джугджур до Тихого океана (рис. 2). Реологические свойства слоев даны в таблице.

Расчет выполнялся в программном пакете с открытым кодом и в свободном доступе Elmer (<https://www.csc.fi/web/elmer>). Программный пакет предназначен для решения широкого круга задач методом конечных элементов (МКЭ).

Течение мантийного вещества моделировалось в верхнем мантийном слое глубиной 407 км [1, 3], поток направлялся от континентальной стороны в сторону океана (рис. 1 а, в). Скорость потока моделировалась в верхней

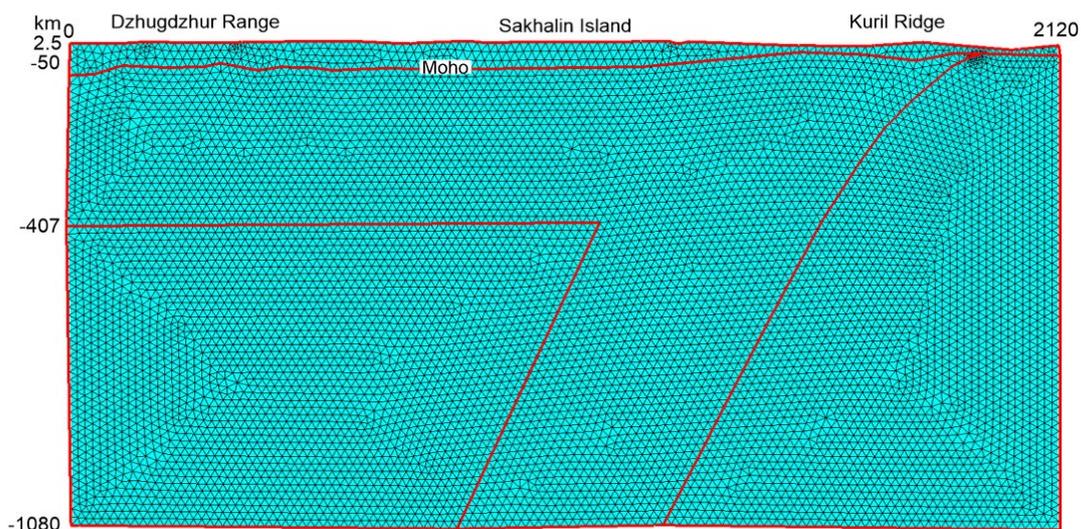


Рис. 1. Двумерная сетка для моделирования мантийной конвекции и оценки вертикальных движений методом конечных элементов (МКЭ).

Fig. 1. Two-dimensional grid for the mantle convection modeling and assessment of vertical motions by the method of finite elements (MFE).

Таблица. Характеристики литосферы и мантии, принятые в работе для модели
Table. Lithosphere and mantle characteristics taken in the work for modeling

Слой	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, $\times 10^{11}$ Па	Вязкость, Па·с	Коэффициент Пуассона
Литосфера	3233.6	0.45	$1.0 \cdot 10^{22}$	0.49
Верхний слой мантии	3367.12	2.0	$0.5 \cdot 10^{18}$	0.49
Подлежащий слой мантии	3988.07	0.85	$0.5 \cdot 10^{21}$	0.49

части мантийного слоя, непосредственно под литосферой, с линейным уменьшением скорости до нуля на границе с нижним мантийным слоем. В модели были приняты два варианта значения скорости: $0.34 \cdot 10^{-9}$ м/с, что соответствует 1 мм/год, и $1.54 \cdot 10^{-9}$ м/с (5 мм/год) [4]. Поток должен был идти горизонтально до границы погружающейся плиты и погружаться вдоль ее границы.

Взаимодействие потока с границами происходило по специальной процедуре «вза-

имодействия жидкой и твердой среды» (fluid structure interaction – FSI) [5]. Суть процедуры заключается в определении сил, действующих на поверхность, выводимых из решения уравнения Навье–Стокса для потока. Сначала при допущении, что геометрия поверхности, с которой взаимодействует вязкая жидкость, постоянна, решается уравнение Навье–Стокса с неподвижными граничными поверхностями для скорости потока. Затем рассчитываются силы, воздействующие на поверхность твердого тела.

С использованием этих величин рассчитываются деформации в твердом теле. Полученные деформации вновь принимаются как постоянные, и повторяется решение для флюида. Процесс повторяется до достижения заданного значения сходимости.

Мантийный поток при движении взаимодействовал через процедуру FSI с нижней границей литосферы.

Уравнение Навье–Стокса и уравнение деформирования твердого тела решалось при следующих условиях: максимальное количество итераций – 500; итерации – BiCGStab (стабилизированный метод бисопряженных градиентов); материал несжимаемый максвелловского типа; предел сходимости итерации – 10^{-7} ; предобуславливатель – неполное LU-разложение без заполнения ILU0.

Неподвижными элементами модели были определены боковые и нижние стороны модели и поверхность «погружающейся плиты». Земная поверхность оставалась свободной.

Решение выполнялось по типу «переходящее» (transient) с точностью схождения до -7 степени с временными интервалами шага в 1 млн лет до 30 шагов, т.е. 30 млн лет.

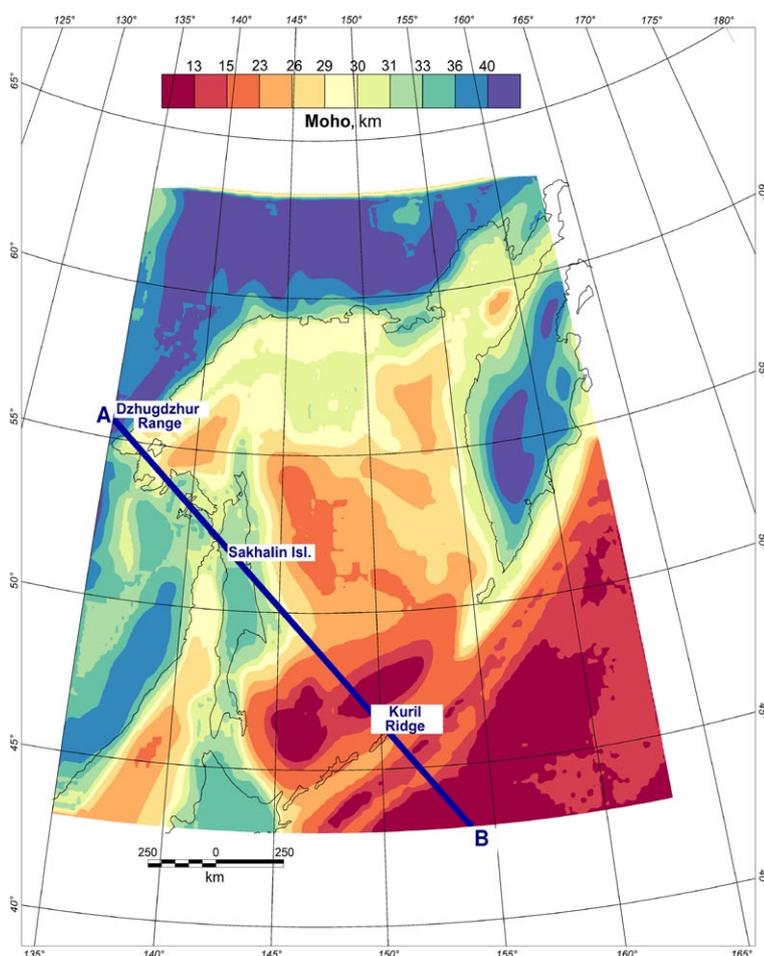


Рис. 2. Схема расположения профиля, выбранного для моделирования (линия А–В). Цветом показана глубина до границы Мохо (в км).

Fig. 2. Location scheme of the profile selected for modeling (line A–B). The depth down to Moho discontinuity (in km) is shown by color.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования, при заданных параметрах, показали восходящие вертикальные движения с амплитудой, варьирующей от 0 до 3 м при скорости потока 1 мм/год (рис. 3) и увеличивающейся до 10–13 м при скорости 5 мм/год. Заметные участки воздыманий земной поверхности локализовались на участках профиля с центром в районе о. Сахалин и Курильской гряды (рис. 3). Надо заметить, что

наблюдается связь амплитуд вертикальных дислокаций с конфигурацией границы Мохо.

Горизонтальные смещения по большей части имеют незначительное отрицательное значение под континентальной частью профиля, т.е. в этом месте верхняя часть литосферы испытывает растяжения. Но начиная с района западнее о. Сахалин и до Курильской гряды горизонтальные смещения согласуются с направлением мантийной конвекции и испытывают сжатие.

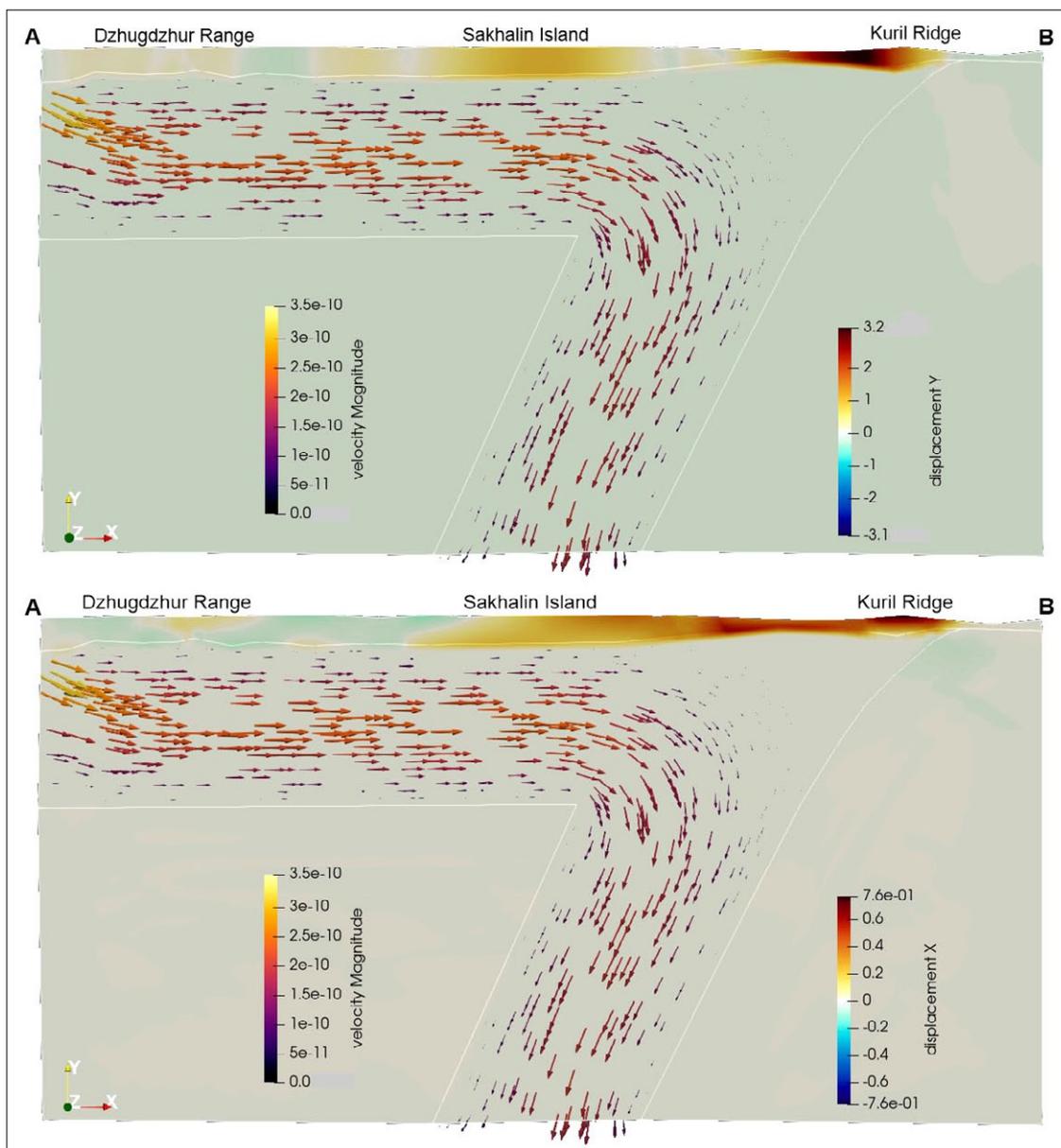


Рис. 3. Результаты моделирования мантийной конвекции по профилю А–В с иллюстрацией смещений по горизонтали – координате у (вверху) и координате x. Шкала Displacement Y – амплитуда вертикальных смещений (в м). Шкала Velocity Magnitude – значения скоростей мантийной конвекции (в м/с), данная шкала относится к стрелкам.

Fig. 3. The results of mantle convection modeling along profile A–B with illustration of the horizontal displacements – along y coordinate (up) and along x coordinate. Displacement Y scale is an amplitude of vertical displacements (in m). Velocity Magnitude scale represents the values of mantle convection velocities (in m/s), this scale refers to the arrows.

Необходимо отметить, что моделирование выполнялось со следующими допущениями:

- для моделирования использована ограниченная по размеру область пространства;
- погружающаяся океаническая плита в модели сохранялась закрепленной и неподвижной;
- не учитывались горизонтальные, вращательные движения Охотоморской плиты;
- не учитывались термические особенности, вызванные мантийной конвекцией;
- не учитывалось влияние гидроизостазии на амплитуду вертикальных движений;
- глубина, до которой происходит движение мантийного потока, заимствована из результатов термодинамического моделирования [1, 3], следовательно, может иметь отклонения от реальных масштабов конвекции.

Это ограничило приближение модели к реальности. Но основную задачу – определить влияние мантийной конвекции на тенденции в вертикальных движениях земной коры для Охотоморского региона – удалось решить.

Учитывая, что оценки амплитуды вертикальных движений по следам поднятых древних береговых линий для временных интервалов от 190 до 120 тыс. лет назад варьируют, например, для о. Сахалин от 40 до 10–11 м [6], следует признать, что мантийная конвекция, в зависимости от скорости потока мантийного вещества, способна вносить существенный вклад в неотектонические вертикальные движения и без нее очертания береговой линии и топо-батиметрия могли бы иметь другую конфигурацию.

Современный конвективный поток в верхней мантии в Охотоморском регионе, предположительно, сформировался синхронно с современным морфоструктурным планом в конце неогена – начале плейстоцена [7, 8]. Остается открытым вопрос, насколько на протяжении этого времени поток сохранял свою стабильность относительно распределения в нем давления, чтобы иметь возможность изменять тенденции в вертикальных смещениях.

Амплитуды вертикальных смещений в результате эффекта гидроизостазии – изменений нагрузки водного столба в 100–130 м, которые происходили при смене ледниковых эпох межледниковьями, достигают нескольких метров

в зависимости от реологических свойств мантийных слоев [9]. Это соизмеримо с параметрами вертикальных смещений, полученными при моделировании конвективного потока. Моделирование также показало зависимость вертикальных смещений от мощности земной коры. Это ставит вопрос о характере взаимодействия гидроизостазии и мантийной конвекции. Если влияние гидроизостазии прямо зависит от мощности земной коры: чем большая глубина до границы Мохо, тем большая чувствительность к нагрузке водного столба [9], то влияние конвекции на вертикальные движения в большей степени зависит от распределения давления в потоке мантийного вещества. Вклад мантийной конвекции в амплитуду вертикальных смещений играет решающую роль на участках, которые расположены ближе к островной дуге зоны субдукции.

Заключение

Моделирование вертикальных смещений в результате мантийной конвекции, при заданных условиях, дало значения вертикальных смещений в первые метры. Сравнительная оценка амплитуд вертикальных смещений вследствие мантийной конвекции для Охотоморского региона, как активной континентальной окраины, с вертикальными движениями, вызванными эффектом гидроизостазии при сменах ледниковых и межледниковых эпох, показала, что вертикальные движения, обусловленные мантийной конвекцией, в целом превышают амплитуду смещений в результате эффекта гидроизостазии.

В результате расчетов, с учетом близкой к реальной топографии района и глубины положения границы Мохо на профиле, наибольшие вертикальные смещения были получены для участка о. Сахалин и Курильской гряды с примыкающей к гряде частью Курильской впадины (Охотоморской котловины), а наименьшие и даже незначительно отрицательные – для района Шантарских островов, западного шельфа Сахалина в месте перехода в Курильскую впадину.

Следует оговориться, что максимальные положительные вертикальные смещения вблизи Курильской гряды, вызванные конвективным потоком с западной стороны, не учитывают вклада в вертикальные смещения в этом

месте в результате погружения океанической плиты. Оценка взаимодействия конвективного потока и погружающейся плиты нуждается в специальном моделировании.

При оценках геодинамической ситуации и напряженно-деформированного состояния земной коры необходимо учитывать мантийную конвекцию в задуговой области зон субдукции островодужного типа.

Список литературы

1. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. **2001**. *Глубинная геодинамика*. 2-е изд., доп. и перераб. Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил. «ГЕО», 409 с.
2. Hayes G.P., Wald D.J., Johnson R.L. **2012**. Slab1.0: A three dimensional model of global subduction zone geometries. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B1): B01302. <https://doi.org/10.1029/2011jb008524>
3. Billen M.I., Gurnis M., Simons M. **2003**. Multiscale dynamics of the Tonga–Kermadec subduction zone. *Geophysical J. International*, 153: 359–388. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2003.01915.x>
4. Schellart W.P., Stegman D.R., Farrington R.J., Moresi L. **2011**. Influence of lateral slab edge distance on plate velocity, trench velocity, and subduction partitioning. *J. of Geophysical Research*, 116: B10408. <https://doi.org/10.1029/2011jb008535>
5. Råback P., Ruokolainen J., Lyly M., Järvinen E. **2001**. Fluid-structure interaction boundary conditions by artificial compressibility. In: *ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conference 2001, Swansea, Wales, UK, 4–7 September 2001*. URL: https://www.csc.fi/documents/49902/86943/eccomas2001_raback.pdf/8c572fe9-0406-4f90-8197-e9a78bce5810
6. Булгаков Р.Ф., Сеначин В.Н. **2019**. Морские террасы и влияние эффекта гидроизостазии на вертикальные движения Сахалина. *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 277–286. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286>
7. Мельников О.А. **2011**. Остров Сахалин: его геологическое прошлое, настоящее и вероятное будущее. *Вестник Сахалинского музея*, Южно-Сахалинск. URL: http://old.sakhalinmuseum.ru/ufile/29_Vestnik-p262-273.pdf
8. Сим Л.А., Богомоллов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. **2017**. Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(1): 181–202. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>

Об авторе

Булгаков Рустам 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

Поступила в редакцию 15.05.2022

После рецензирования 16.06.2022

Принята к публикации 18.06.2022

9. Булгаков Р.Ф. **2021**. 3D-моделирование эффекта гидроизостазии с близкой к реальной конфигурацией поверхности Мохо для Охотского моря. *Геосистемы переходных зон*, 5(4): 339–345. <https://doi.org/10.30730/trz.2021.5.4.339-345>

References

1. Dobretsov N.L., Kiryashkin A.G., Kiryashkin A.A. **2001**. *Deep-level geodynamics*. 2 ed., add. and rework. Novosibirsk: Publ. by the Siberian Branch of RAS, GEO, 409 p. (In Russ.). <https://www.geokniga.org/books/26050>
2. Hayes G.P., Wald D.J., Johnson R.L. **2012**. Slab1.0: A three dimensional model of global subduction zone geometries. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B1): B01302. <https://doi.org/10.1029/2011jb008524>
3. Billen M.I., Gurnis M., Simons M. **2003**. Multiscale dynamics of the Tonga–Kermadec subduction zone. *Geophysical J. International*, 153: 359–388. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2003.01915.x>
4. Schellart W.P., Stegman D.R., Farrington R.J., Moresi L. **2011**. Influence of lateral slab edge distance on plate velocity, trench velocity, and subduction partitioning. *J. of Geophysical Research*, 116: B10408. <https://doi.org/10.1029/2011jb008535>
5. Råback P., Ruokolainen J., Lyly M., Järvinen E. **2001**. Fluid-structure interaction boundary conditions by artificial compressibility. In: *ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conference 2001, Swansea, Wales, UK, 4–7 September 2001*. https://www.csc.fi/documents/49902/86943/eccomas2001_raback.pdf/8c572fe9-0406-4f90-8197-e9a78bce5810
6. Bulgakov R.F., Senachin V.N. **2019**. Marine terraces and hydroisostasy influence on the vertical movements of the Sakhalin. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(3): 277–286. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286>
7. Melnikov O.A. **2011**. Sakhalin Island: its geological past, recent and probable future. *Vestnik of the Sakhalin Museum*. http://old.sakhalinmuseum.ru/ufile/29_Vestnik-p262-273.pdf
8. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A. **2017**. Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
9. Bulgakov R.F. **2021**. 3D modeling of the hydroisostasy effect with a configuration of Moho surface of the Sea of Okhotsk close to real. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(4): 339–345. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/trz.2021.5.4.339-345>

About the Author

Bulgakov, Rustam 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 RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, r.bulgakov@imgg.ru

Received 15 May 2022

Revised 16 June 2022

Accepted 18 June 2022