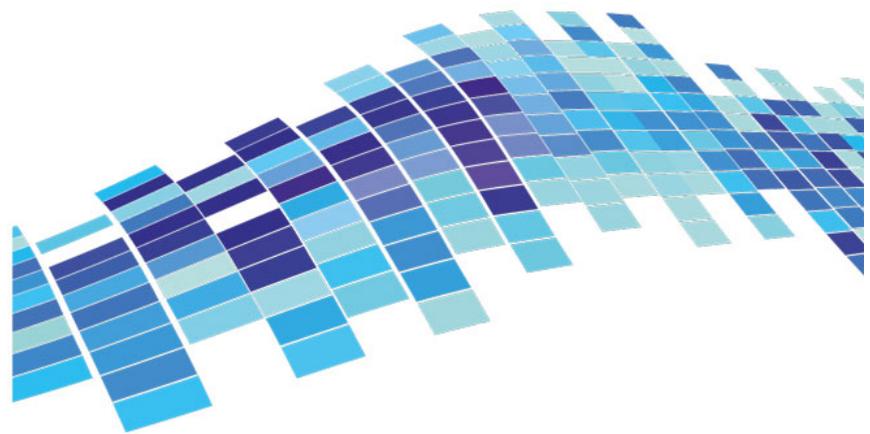


ISSN 2541-8912 (Print)
ISSN 2713-2161 (Online)

ГЕОСИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН



GEOSYSTEMS
of Transition Zones

2024 Том 8 № 4

Решением Научно-экспертного совета Морской коллегии
при Правительстве Российской Федерации
доктор геолого-минералогических наук, доцент, член редколлегии
нашего журнала, Ренат Белалович Шакиров награжден медалью
«За достижения в морской науке».

Редколлегия и редакция журнала «Геосистемы переходных зон» поздравляют
Рената Белаловича и его коллектив с этой неординарной наградой
и желают ему дальнейших успехов в морских научных исследованиях
и экспертной работе на международных площадках.





Вклад гидроизостазии в современные изменения уровня морей и вертикальные движения твердой поверхности Земли для морей Дальнего Востока

Р. Ф. Булгаков

E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

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

Резюме. Глобальное потепление климата вызывает дальнейшую деградацию ледников и высвобождение воды в Мировой океан. Поступление дополнительного объема воды ведет к повышению уровня морей. На скорость современного повышения уровня воды влияют остаточные процессы после последнего глобального оледенения с максимумом около 20 тыс. л.н. В результате таяния крупных покровных ледников в районах вдали от центров оледенений, таких как дальневосточные моря, происходило нагружение морского дна слоем воды в 120 м – гидроизостазия, которое вызвало вертикальные смещения дна и суши прибрежных районов. Хотя поступление талой воды ледников прекратилось 4–6 тыс. л.н., тем не менее за счет вязких свойств мантийных слоев вертикальные смещения твердой поверхности продолжают до сих пор, что вносит свой вклад в современное повышение уровня воды в морях Мирового океана. Вклад остаточных процессов должен учитываться при оценках современных колебаний уровня морей и вертикальных движений твердой поверхности Земли. Здесь приводятся полученные методом численного моделирования оценки вклада в современное повышение уровня морей и вертикальных движений твердой поверхности Земли остаточных движений, связанных с последствиями последнего глобального оледенения, по отношению к дальневосточным морям. В результате проведенного моделирования показано, что климатическое повышение уровня моря сдерживается за счет отрицательного вклада гидроизостазии в геодинамически активных зонах.

Ключевые слова: гидроизостазия, относительные изменения уровня морей, движения твердой поверхности Земли, повышение уровня морей

The contribution of hydroisostasy to modern changes in sea level and vertical displacements of the solid surface of the Earth in the Far Eastern seas

Rustam F. Bulgakov

E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

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

Abstract. Global warming causes further degradation of glaciers and the release of water into the World Ocean. The influx of additional water leads to a rise in sea level. The rate of modern water level rise is still influenced by the residual processes from the last global glaciation, with its maximum about 20 thousand years ago. The melting of large ice sheets in areas far from the centers of glaciation, such as the Far Eastern seas, caused the loading of the seabed with a 120 m layer of water – hydroisostasy – which caused vertical displacements of the seafloor and coastal areas. Although the influx of the glacier meltwater ceased 4–6 thousand years ago, due to the viscous properties of mantle layers, vertical displacements of the solid surface continue to this day, which contributes to the modern rise in water level in the seas of the World Ocean. The contribution of residual processes should be taken into account when assessing modern fluctuations in sea level and vertical displacements of the solid surface of the Earth. This study provides the estimated contribution of residual displacements associated with the consequences of the last global glaciation to the modern rise in sea level and vertical displacements.

ments of the solid surface of the Earth in the Far Eastern seas, which was obtained by numerical modeling. As a result of the conducted modeling, it was shown that the climatic rise in sea level is restrained by the negative contribution of hydroisostasy in geodynamically active zones.

Keywords: hydroisostasy, relative changes in sea level, displacements of the solid surface of the Earth, rise in sea level

Для цитирования: Булгаков Р.Ф. Вклад гидроизостазии в современные изменения уровня морей и вертикальные движения твердой поверхности Земли для морей Дальнего Востока. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 4, с. 357–366. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.4.357-366>; <https://www.elibrary.ru/ayiipa>

For citation: Bulgakov R.F. The contribution of hydroisostasy to modern changes in sea level and vertical displacements of the solid surface of the Earth in the Far Eastern seas. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, No. 4, pp. 357–366. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.4.357-366>; <https://www.elibrary.ru/ayiipa>

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ FWWM-2024-0005).

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (No. FWWM-2024-0005).

Введение

Несколько десятков тысяч л.н., в период времени, известный как поздний плейстоцен, случилось очередное из климатических потрясений – похолодание климата, вызвавшее глобальное оледенение. Последнее максимальное похолодание произошло около 20 тыс. л.н., оно вызвало падение уровня воды в Мировом океане на 120 м, а последующее глобальное потепление климата – трансгрессию воды, поднявшую уровень морей Мирового океана к современным отметкам [1].

Хотя послеледниковая трансгрессия прекратилась 4–6 тыс. л.н., тем не менее ее вклад в изменения уровня морей сохраняется в настоящее время [2].

Современные изменения уровня морей складываются из нескольких составляющих: изменения плотности воды (стерические) в результате изменения солености и температуры воды (термостерические), изменения уровня за счет изменения массы воды в Мировом океане (баристатические), изменения объема чаши морей и океанов за счет тектоники и, наконец, за счет гляцио- и гидроизостазии [3]. Отдельный фактор, влияющий на изменение уровня морей, – это прецессия земной оси, которая варьирует, в том числе, в зависимости от распределения масс льда и воды на поверхности Земли [4].

Для реалистичной оценки амплитуды современных изменений уровня морей необхо-

димо учитывать вклад последствий глобальных оледенений, особенно последнего.

Очень сложной задачей является выделение составляющих из суммарных современных значений изменения уровня морей. Многое зависит от современных способов наблюдений за изменениями уровня морей. Хотя на побережьях дальневосточных морей присутствуют уровнемерные станции, но они достаточно редко расположены, особенно те, на которых полученные значения привязаны к высотной системе (PSMSL – RLR, <https://psmsl.org/>). Привязка к высотной системе делает эти данные кондиционными и позволяет использовать их для реалистичной оценки современных колебаний уровня морей.

Уровень воды морей контролируется рядом методов: данные береговых уровнемеров, данные, полученные спутниками, – альтиметрические измерения уровня поверхности морей и гравиметрические измерения изменений масс воды на поверхности Земли. Вертикальные смещения твердой поверхности Земли, которые влияют на значения глубины морей, учитываются ГНСС-наблюдениями.

Настоящая работа представляет попытку рассчитать методом численного моделирования вклад остаточных явлений, связанных с последствиями последнего глобального оледенения, в современные вертикальные движения и относительные изменения уровня морей по отношению к дальневосточным морям как геодинамически активным зонам.

Методы исследования

Проблема учета вклада гляцио- и гидроизостазии в современные изменения уровня морей Мирового океана

Результаты наблюдений за современными изменениями уровня морей Мирового океана напрямую зависят от применяемых методов наблюдений.

На береговых уровнемерных станциях измеряют относительное изменение уровня моря – глубину моря в конкретной точке. Но их использование при оценке вклада остаточных движений в колебания уровня морей затрудняется тем, что сеть уровнемерных станций по всему миру относительно редкая.

Наблюдения с использованием лазерных высотометров, установленных на спутниках (TOPEX) (<https://sealevel.jpl.nasa.gov/missions/topex-POSEIDON/summary/>), хотя и покрывают большую площадь, но предоставляют данные об изменениях высотного положения поверхности воды без учета изменения высотного положения дна (твердой поверхности Земли). Отсутствие данных о высотном положении дна не позволяет напрямую сравнивать результаты уровнемерных станций с альтиметрическими данными спутников.

В расчетах изменений уровня морей при моделировании за поверхность водной поверхности принимается поверхность геоида при условии сохранения постоянной массы воды и ледниковых покровов. Положение поверхности геоида определяется гравитационным полем и его местными аномалиями, создаваемыми перемещаемыми массами воды, льда и вещества земных недр [5].

Современные высокоточные спутниковые системы наблюдений за вариациями гравитационного поля Земли (GRACE) позволяют следить за изменениями масс на земной поверхности. После обработки измерений, полученных GRACE [6], результаты представляются в виде условной высоты водного слоя, в них закладывается ошибка, связанная с изменениями гравитационного поля не только за счет изменения толщины водного слоя и объема масс льда, но и за счет перемещений масс мантийных слоев (сопутствующее изменение гравитационного поля).

Очевидно, что результаты, полученные по данным спутников, измеряющих гравитационное поле, и результаты высотометрных спутников, а также данные уровнемерных станций не могут совпадать.

Вклад в изменения уровня морей современного потепления климата оценить можно только приблизительно, тем не менее актуальность проблемы требует поиска подходов к ее решению.

Остаточные процессы от изменений нагружения и разгрузки земной поверхности в период смены ледниковой эпохи межледниковьем могут быть оценены путем численного моделирования с применением специализированных компьютерных программных комплексов.

Особенности программного комплекса SELEN4

Программный комплекс SELEN4 (Sealevel Equation Solver) [7–9] является последней версией разрабатываемого с начала 2000-х годов продукта для расчета изостатической коррективы после окончания ледникового периода и таяния покровных ледников.

Программный комплекс SELEN при расчете использует осесимметричную модель Земли, и расчет ведется по всей поверхности планеты. Верификация результатов осуществляется путем сравнения полученных данных и имеющихся палеогеографических данных. Ранее нами с помощью комплекса SELEN были выполнены расчеты по оценке вклада гидроизостазии в геодинамику и изменения уровня для дальневосточных морей [10, 11 и др.].

В последней версии программного комплекса учитываются изменения береговой линии вследствие изменений уровня морей и прецессии земной оси в результате таяния покровных ледников. Если учет изменений конфигурации береговой линии влияет на увеличение точности оценки изменений уровня моря в конкретном месте непосредственно, то прецессия земной оси в результате снятия нагрузки ледниковых покровов – через изменение инсоляции. Изменение угла наклона оси вращения Земли влияет также на перераспределение сил, действующих на оболочку Земли и мантийные слои, что очевидным образом влияет на деформации твердой земной поверхности.

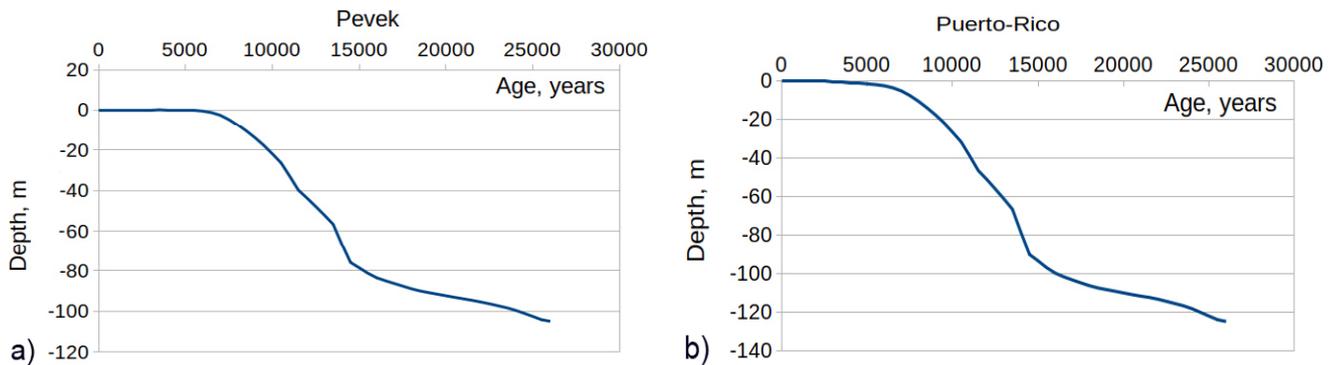


Рис. 1. Изменение относительного уровня моря по результатам расчета в программном комплексе SELEN4 с использованием сценария ледниковой истории ICE6G у пункта Певек (а) и, для сравнения, у пункта Пуэрто-Рико (б).

Fig. 1. Change in relative sea level based on the calculation results in the SELEN4 software package using the ICE6G glacial history scenario at the Pevek point (a) and, for comparison, at the Puerto Rico point (b).

Учет изменений конфигурации береговой линии в SELEN4 проводится с учетом следующих параметров: 1) площадь океана, свободного от льда; 2) объем плавающего льда; 3) объем льда, лежащего на дне моря; 4) объем льда, лежащего на суше выше уровня моря; 5) площадь суши, свободной от льда.

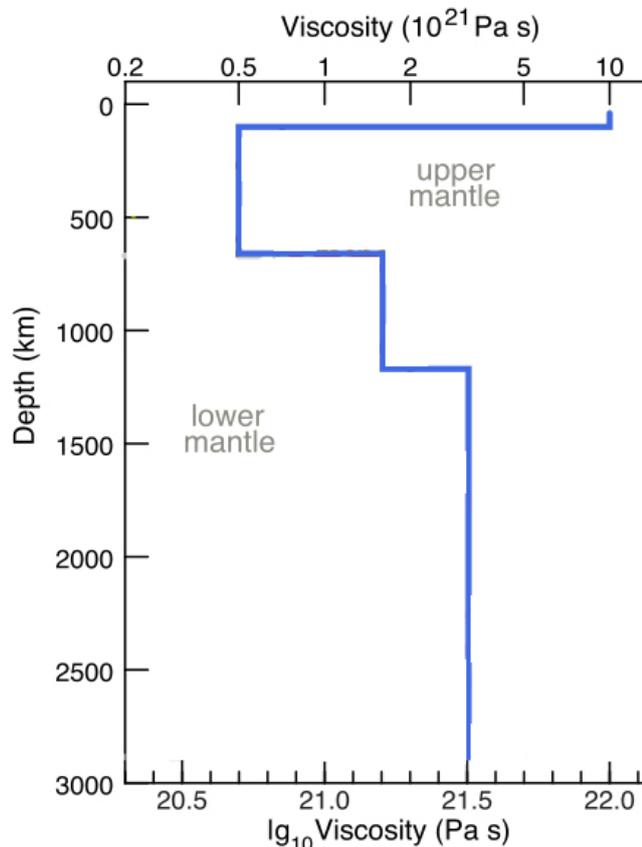


Рис. 2. Распределение значений вязкости мантийных слоев в модели VM5a [13].

Fig. 2. Distribution of viscosity values of mantle layers in the VM5a model [13].

Изменение наклона земной оси оценивается приблизительно в 18 км по поверхности Земли вследствие изменения нагрузки на поверхность за счет таяния покровных ледников начиная с 26 тыс. л.н. Скорость изменения наклона земной оси оценивается в настоящее время от 1° до 3° в миллион лет. Отмечается ускорение наклона оси до 5° /млн лет в период ускорения таяния ледников во время эпизода MWP-1A (meltwater pulse 1A) – в период между 14.3 и 12.8 тыс. л.н. [12].

В данной работе выполнен расчет в программном комплексе SELEN4 с учетом изменений конфигурации береговой линии за время послеледниковой трансгрессии и смещения оси вращения Земли. Расчет проведен до 448 степени сферических гармоник с разрешением 100 км по поверхности Земли. Была использована ледниковая история ICE6G (рис. 1 а, б) и реологический профиль оболочек Земли VM5a (рис. 2). Счет выполнен на 48-ядерном процессоре, потребовалось 26 Гб оперативной памяти и 26 ч времени.

Материалы

Для оценки вклада остаточных процессов после таяния покровных ледников и увеличения объема воды в Мировом океане результаты моделирования сравнивались с данными уровнемерных станций и ГНСС-наблюдений.

Уровнемерные наблюдения были взяты из базы данных постоянных наблюдений за изменениями уровня морей (<https://psmsl.org/>). Использовались только данные, приведенные к местной системе высот (RLR, revised local

reference) с учетом истории перенивелировок высотной системы, т.е. контроля геотектонических изменений, которые происходили с начала наблюдений.

Для оценки вертикальных движений твердой поверхности Земли принимались данные со станций ГНСС, расположенных поблизости от уровневых станций (<https://www.sonel.org/>). Оценки скоростей движения твердой поверхности, выложенные на сайте <https://www.sonel.org/>, выполнены несколькими методами, разработанными в разных учреждениях. Так, решение URL6b GPS получено Международным ГНСС-сервисом (IGS – International GNSS service); решение NGL14 – Nevada Geodetic Laboratory; JPL14 – Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology; GT3-решение – Германским научно-исследовательским центром наук о Земле (GFZ German Research Centre for Geoscience).

Результаты и обсуждение

На рис. 3–7 приведены результаты моделирования.

На рис. 3 показаны современные изменения высоты геоида. Учет изменения высоты геоида, по сути, аналог мониторинга гравиметрического поля:

$$G = \Phi/g,$$

где G – высота геоида, Φ – изменение гравитационного потенциала, g – ускорение свободного падения.

Изменение высоты водной поверхности N (рис. 4) есть аналог спутниковой альтиметрии:

$$N = G + c,$$

где c – постоянная соотношения масс воды и льда.

Расчет изменения нагрузки водного слоя L , пересчитанной в мм/год (рис. 5), суть аналог миссии GRACE. Изменение веса льда или воды на единицу площади делится, соответственно, на плотность льда или воды.

Вертикальные смещения твердой поверхности Земли (рис. 6), аналог GNSS-наблюдений, определяются функцией Грина от значения нагрузки.

Изменение относительного уровня моря (глубины) (рис. 7): $S = N - U$, где N – изме-

нение высоты водной поверхности, U – вертикальное смещение твердой поверхности.

Результаты моделирования остаточных процессов в изменениях относительного уровня морей и вертикальных смещений твердой поверхности Земли по данным оценок наблюдений на ГНСС-станциях приведены в таблице.

Оценки скоростей, полученных в разных исследовательских центрах, различаются в пределах менее 1 мм/год (см. таблицу).

Сравнивая скорости движений, полученные по результатам полевых наблюдений и по результатам моделирования, можно оценить долю остаточных движений после ледникового максимума.

В таблице приведены значения вертикальных движений твердой поверхности Земли и относительных изменений уровня морей, полученные разными способами. Учитывая, что натурные наблюдения «в поле» имеют точный характер, для сравнительного анализа взяты доступные данные по дальневосточным морям. Также для сравнения были взяты несколько точек из районов в «ближней зоне» покровных оледенений. Это станции Spikarna в Швеции и Churchill на берегу зал. Гудзон.

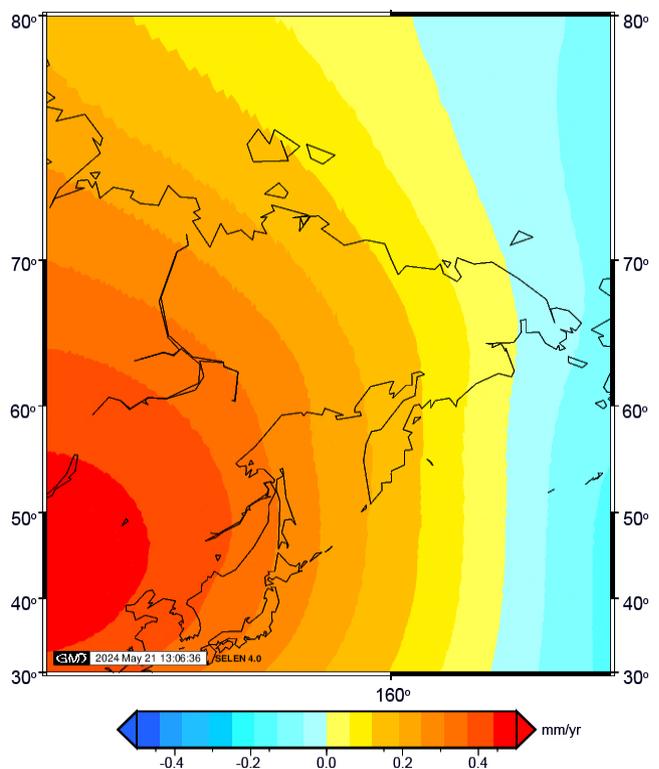


Рис. 3. Современное изменение высоты геоида (мм/год).

Fig. 3. Modern change in geoid height (mm/year).

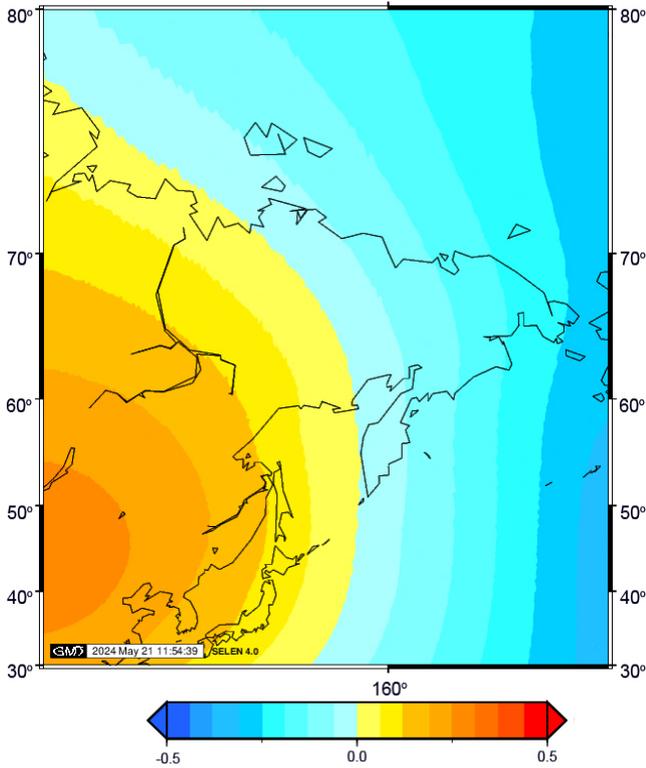


Рис. 4. Изменение высоты водной поверхности (мм/год).
Fig. 4. Change in water surface height (mm/year).

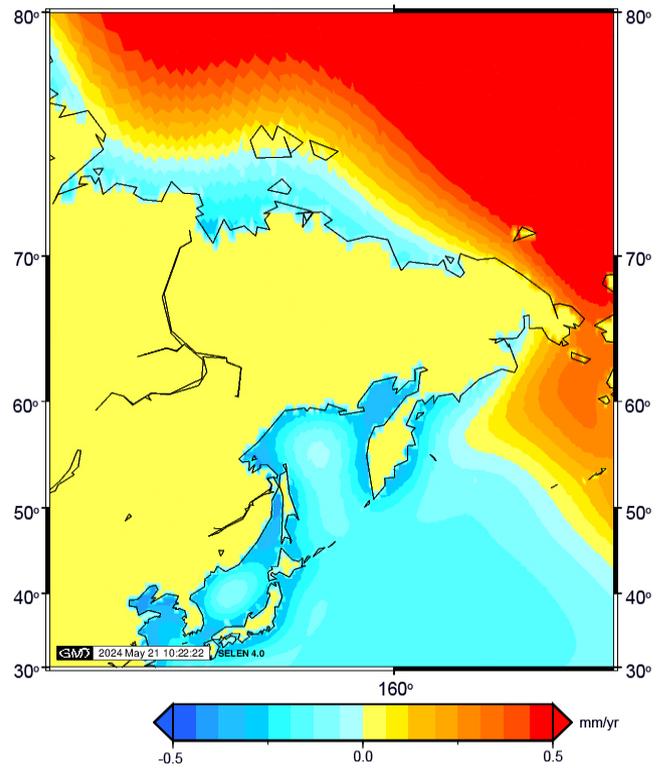


Рис. 5. Изменение нагрузки водного слоя пересчитанной в мм/год.
Fig. 5. Change in water layer load recalculated in mm/year.

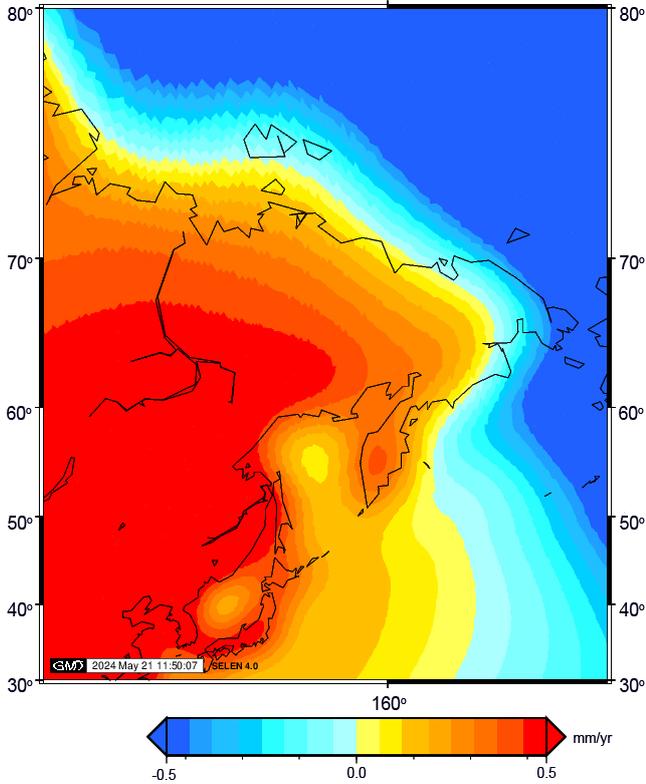


Рис. 6. Вертикальные смещения твердой поверхности Земли (мм/год).
Fig. 6. Vertical displacements of the solid surface of the Earth (mm/year).

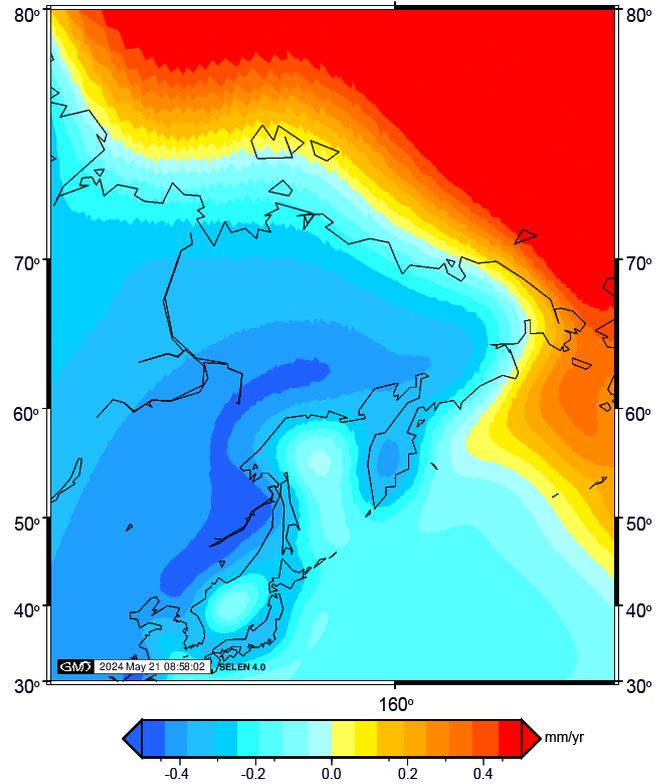


Рис. 7. Изменение относительного уровня моря (глубины) (мм/год).
Fig. 7. Change in relative sea level (depth) (mm/year).

Таблица. Результаты моделирования остаточных процессов в изменениях относительного уровня морей и вертикальных смещений твердой поверхности Земли по данным наблюдений на GNSS-станциях

Table. Results of modeling of residual processes in the relative sea level changes and vertical displacements of the solid surface of the Earth based on observations at GNSS stations

Станция	Решение	Номер станции	Координаты		Длительность наблюдений, лет	Полнота данных, %	Вертикальные смещения, мм/год	Неопределенность скорости смещений, мм/год	Изменения уровня моря, мм/год
			долгота	широта					
Петропавловск-Камчатский									
PETS	JPL14	12355M003	158.6501	53.0233	17.87	95	-5.07	1.03	
PETS	NGL14	12355M003	158.6501	53.0233	17.81	97	-5.99	1.11	
PETS	GT2	12355M003	158.6501	53.0233	17.87	95	-5.07	1.03	
PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY	RLR	824	158.65	52.9833333	65	98.4			3.38
SELEN4							-0.496		-0.623
Бухта Нагаева (Магадан)									
MAG0	JPL14	12354M001	150.77	59.5758	24.42	74	0.9	0.31	
MAG0	NGL14	12354M001	150.77	59.5758	24.36	74	1.01	0.51	
MAG0	GT2	12354M001	150.77	59.5758	24.42	74	0.9	0.31	
NAGAEVO	RLR	827	150.716667	59.55	65	95.8			1.48
SELEN4							-0.505		-0.548
Япония, Хакодате 1 (Находате)									
P204	NGL14	21779S001	140.7245	41.7817	18.95	93	5.85	1.11	
HAKODATE1	RLR	813	140.724722	41.781667	66	99.2			-1.145
SELEN4							-0.544		-0.496
Тикси (Якутия)									
TIXI	JPL14	12360M001	128.8664	71.6345	23.52	95	1.05	0.26	
TIXI	NGL14	12360M001	128.8664	71.6345	23.46	96	0.77	0.56	
TIXI	GT2	12360M001	128.8664	71.6345	23.52	95	1.05	0.26	
TIXI	URL7	12360M001	128.8664	71.6345	20.99	92.84	0.61	0.21	
TIKSI BUKHTA	RLR	569	128.916667	71.5833333	61	99.7			-0.705
SELEN4							0.294		-0.266

<i>Швеция, Спикарна (Spikarna)</i>									
0VIB	NGL14		17.4277	62.3738	11.88	99	9.41	0.68	
0VIB	URL7	99999M009	17.4277	62.3738	10.62	94.25	9.72	0.36	
SPIKARNA	RLR	1211	17.531111	62.363333	55	98.7			-4.545
SELEN4							7.74		-7.426
<i>Канада, Черчилл (Churchill)</i>									
CHUR	JPL14	40128M002	-94.0887	58.7591	27.15	95	10.49	0.12	
CHUR	NGL14	40128M002	-94.0887	58.7591	27.95	96	10.45	0.42	
CHUR	GT2	40128M002	-94.0887	58.7591	27.15	95	10.49	0.12	
CHUR	URL7	40128M002	-94.0887	58.7591	20.94	90.14	10.38	0.22	
CHURCHILL	RLR	447	-94.183333	58.766667	83	90.5			-7.083
SELEN4							10.735		-9.614

Обращает на себя внимание достаточно хорошее совпадение как в скоростях движений твердой поверхности, так и в изменениях относительного уровня моря в ближней зоне с результатами моделирования SELEN4. Так, берег зал. Гудзон, который находился под ледником, но в стабильных условиях в сравнении с активными геодинамическими зонами, по данным ГНСС показал скорость воздымания твердой поверхности в среднем 10.45 мм/год, по результатам моделирования SELEN4 – 10.735 мм/год. Относительное изменение уровня моря в этой точке по данным натурных наблюдений (-7.083) мм/год, по результатам моделирования – (-9.614) мм/год.

Аналогичное, достаточно хорошее совпадение результатов моделирования наблюдается на балтийском побережье Швеции на станции Spikarna. По данным ГНСС, скорость воздымания твердой поверхности в среднем 9.565 мм/год, по результатам моделирования SELEN4 – 7.74 мм/год. Относительное изменение уровня моря в этой точке по данным натурных наблюдений (-4.545) мм/год, по результатам моделирования – (-7.426) мм/год.

Следует отметить, что в данном случае преобладающим фактором в воздымании твердой поверхности и изменении относительного уровня моря являются остаточные движения в результате гляциоизостазии.

По мере отдаления от «ближней зоны» центров оледенения разница между расчетными результатами, которые учитывают вклад после таяния ледников, и полевыми наблюдениями, которые дают суммированный эффект, увеличивается, что в принципе ожидаемо. То есть вклад от гляциоизостазии в современные процессы сокращается, остается гидроизостазия и сопутствующие процессы, такие как «сифонинг» и другие, связанные с изменением объема и массы воды, а также вступают в дело геодинамические процессы.

На станции «Тикси» (Якутия) скорость воздымания твердой поверхности по данным ГНСС в среднем 0.87 мм/год, по результатам моделирования SELEN4 – 0.294 мм/год. Относительное изменение уровня моря в этой точке по данным натурных наблюдений (-0.705) мм/год, по результатам моделирования – (-0.266) мм/год.

По мере приближения к геодинамически активным побережьям, в дальней от центров оледенения зоне, разница между натурными наблюдениями и расчетными данными еще значительнее, вплоть до смены знака движения.

Так, в бухте Нагаева (Магадан) средняя скорость воздымания по данным ГНСС 0.94, а по результатам моделирования (–0.505) мм/год. Относительное изменение уровня моря в этой точке по данным натурных наблюдений +1.48, по результатам моделирования (–0.548) мм/год.

На станции «Петропавловск-Камчатский» скорость погружения твердой поверхности по данным ГНСС в среднем –5.38, по результатам моделирования –(–0.496) мм/год. Относительное изменение уровня моря в этой точке по данным натурных наблюдений +3.38, по результатам моделирования (–0.623) мм/год.

На станции «Хакодате 1» (Япония) скорость воздымания твердой поверхности по данным ГНСС в среднем +5.85, по результатам моделирования –(–0.544) мм/год. Относительное изменение уровня моря в этой точке по данным натурных наблюдений (–1.145), по результатам моделирования (–0.496) мм/год.

Если направления движения твердой поверхности по натурным наблюдениям и результатам моделирования противоположны, как в случае «Нагаево» или «Хакодате 1» (воздымание по натурным наблюдениям и погружение по расчетным), то вклад от движений твердой поверхности в современное повышение уровня моря отрицательный – за счет эффекта гидроизостазии, т.е. современное повышение уровня моря сдерживается. Однако положительное значение относительных изменений уровня при отрицательных по результатам моделирования свидетельствует о дополнительных факторах, привносящих свой вклад в изменения уровня моря, например термостатических, за счет нагрева вод в связи с потеплением климата.

По данным станции «Петропавловск-Камчатский», твердая поверхность испытывает погружение как по натурным данным, так и по расчетным, что свидетельствует о том, что в этой точке геодинамически обусловленные движения твердой поверхности Земли усили-

ваются фактором гидроизостазии. Но положительные относительные изменения уровня моря (увеличение глубины моря) по натурным данным и отрицательные (уменьшение глубины) по результатам моделирования свидетельствуют о сдерживании повышения уровня моря за счет как геодинамического фактора, так и эффекта гидроизостазии.

На станции «Хакодате 1» твердая поверхность воздымается, но гидроизостазия сдерживает, тогда как глубина моря уменьшается как по натурным наблюдениям, так и по расчетным. В данном случае также получается, что геодинамика, в результате латеральных движений земной коры, и гидроизостазия сдерживают климатическое повышение уровня моря.

Заключение

Любопытным результатом проведенных исследований оказалось то, что, по данным моделирования, климатическое повышение уровня моря сдерживается за счет отрицательного вклада гидроизостазии. Если геодинамический фактор может менять направление в иницировании движений твердой поверхности Земли и тем самым во время нисходящих движений усугубить последствия в повышении уровня морей, то гидроизостазия в геодинамически активных районах оказывает сдерживающее влияние на современное повышение уровня морей.

Актуальность реалистической оценки значений векового повышения уровня морей для безопасной и безубыточной эксплуатации береговых инфраструктур настаивает на более широком изучении данного явления. Приоритетным должно быть как расширение натурных наблюдений за колебаниями уровня морей на береговых уровнемерных станциях с ГНСС-сопровождением, так и анализ палеогеографических данных хода изменений уровня морей в послеледниковую трансгрессию.

Список литературы (References)

1. Peltier W.R. 2002. Comments on the paper of Yokoyama et al. (2000), entitled “Timing of the Last Glacial Maximum from Observed Sea Level Minima”. *Quaternary Science Reviews*, 21(1–3): 409–414. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00112-3](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00112-3)

2. Tamisiea M.E. **2011**. Ongoing glacial isostatic contributions to observations of sea level change. *Geophysical Journal International*, 186: 1036–1044. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2011.05116.x>
3. Gregory J.M., Griffies S.M., Hughes C.W., Lowe J.A., Church J.A., Fukimori I., Gomez N., Kopp R.E., Landerer F., Le Cozannet G., Ponte R.M., et al. **2019**. Concepts and terminology for sea level: mean, variability and change, Both local and global. *Surveys in Geophysics*, 40: 1251–1289. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09525-z.10>
4. Milne G.A., Mitrovica J.X. **1998**. Postglacial sea-level change on a rotating Earth. *Geophysical Journal International*, 133: 1–19. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.1331455.x>
5. Peltier W.R. **1974**. The impulse response of a Maxwell Earth. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 12(4): 649–669. <https://doi.org/10.1029/RG012i004p00649>
6. Caron L., Ivins E.R., Larour E., Adhikari S., Nilsson J., Blewitt G. **2018**. GIA model statistics for GRACE hydrology, cryosphere, and ocean science. *Geophysical Research Letters*, 45. <https://doi.org/10.1002/2017GL076644>
7. Spada G., Stocchi P. **2006**. *The sea level equation: theory and numerical examples*. Roma: Aracne, 96 p.
8. Spada G., Stocchi P. **2007**. SELEN: A Fortran 90 program for solving the “sea-level equation”. *Computers & Geosciences*, 33(4): 538–562. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.08.006>
9. Spada G., Melini D., Galassi G., Colleoni F. **2012**. Modeling sea level changes and geodetic variations by glacial isostasy: The improved SELEN code. *arXiv.1212.5061* [physics.geo-ph]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1212.5061>
10. 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. [Bulgakov R.F., Afanas'ev V.V., Ignatov E.I. 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): 220–229]. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.210-219.220-229>
11. Булгаков Р.Ф. **2022**. Ход послеледниковой трансгрессии на побережье морей Восточно-Сибирского и Лаптевых. *Океанология*, 62(1):117–124. [Bulgakov R.F. **2022**. Process of postglacial transgression on the coasts of the East Siberian and Laptev seas. *Oceanology*, 62: 98–104. <https://doi.org/10.1134/s0001437022010039>]
12. Spada G., Melini D. **2019**. SELEN 4 (SELEN version 4.0): a Fortran program for solving the gravitationally and topographically self-consistent sea-level equation in glacial isostatic adjustment modeling. *Geoscientific Model Development*, 12(12): 5055–5075. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-5055-2019>
13. Argus D.F., Peltier W.R., Drummond R., Moore W.A. **2014**. The Antarctica component of postglacial rebound model ICE-6G_C (VM5a) based on GPS positioning, exposure age dating of ice thicknesses, and relative sea level histories. *Geophysical Journal International*, 198(1): 537–563. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu140>

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, Россия, r.bulgakov@imgg.ru

Поступила 16.10.2024

Принята к публикации 24.11.2024

About the Author

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

Received 16 October 2024

Accepted 24 November 2024