УДК 551.248.2,551.89

Эффект гидроизостатической компенсации в зависимости от ширины шельфа на примере моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря

© 2020 Р. Ф. Булгаков*, В. В. Афанасьев

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

Резюме. С помощью численного моделирования обнаружено, что на характер послеледниковой трансгрессии на побережьях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря влияют ширина шельфа и континентального склона в зависимости от вязкостных свойств слоев мантии. В частности, отметки превышения современного уровня моря, характерные для климатического оптимума голоцена 4–6 тыс. л.н., могут располагаться на разных высотах. В зависимости от площади, оказавшейся под увеличивающейся нагрузкой прибывающей воды при подъеме уровне моря в период послеледниковья, и величины значения вязкости мантийных слоев земная поверхность по-разному реагирует на изменение нагрузки на нее и с разной скоростью восстанавливает изостатический баланс.

Ключевые слова: послеледниковая трансгрессия, вязкость мантии, гидроизостазия, вертикальные движения, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море

Для цитирования: Булгаков Р.Ф., Афанасьев В.В. Эффект гидроизостатической компенсации в зависимости от ширины шельфа на примере моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 3, с. 305–320. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.305-312.313-320

For citation: Bulgakov R.F., Afanas'ev V.V. Effect of hydroisostatic compensation depending on the shelf width on the example of the Laptev and the East Siberian seas. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 305–320. (Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.305-312.313-320

Effect of hydroisostatic compensation depending on the shelf width on the example of the Laptev and the East Siberian seas

Rustam F. Bulgakov*, Victor V. Afanas'ev

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

Abstract. Using the method of numerical simulation, we found the nature of the postglacial transgression along the coasts of the Laptev and the East Siberian seas to be affected by the shelf width and the continental slope depending on the viscosity properties of mantle layers. In particular, the marks exceeding the contemporary sea level, which are typical for the Holocene climatic optimum of 4–6 ka BP, may be located at different heights. Depending on the area, which fell under the increasing load of the incoming water due to the sea level rise during the postglacial period, and the viscosity of the mantle layers, the earth's surface responds differently to changes in the load and restores its isostatic balance with different rates.

Keywords: postglacial transgression, mantle viscosity, hydroisostasy, vertical movements, Laptev Sea, East Siberian Sea

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Введение

Во время климатического оптимума голоцена, 4–6 тыс. л.н., с общепланетарным температурным режимом, превышающим современную климатическую температуру, логично ожидать дополнительную деградацию объема покровных ледников с переходом талой воды в Мировой океан и, вследствие этого, превышением современного уровня моря. И действительно, следы поднятых береговых линий отмечаются на многих побережьях Мирового океана.

При выполнении численных решений так называемого уравнения уровня моря (sea level equation – SLE) в сценариях таяния покровного оледенения не учитываются возможные осцилляции эвстатического уровня моря в результате относительного уменьшения или увеличения объема покровных ледников вследствие климатических колебаний. Таяние ледников принимается как происходившее по асимптотическому закону с завершением деградации Антарктического ледника около 4 тыс. л.н.

Тем не менее для многих побережий моделирование показало превышение уровня моря в период времени 4–6 тыс. л.н. Такие зоны получили наименование – зоны VI Кларка.

В данной работе предпринимается попытка исследовать этот феномен на примере побережий морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, которые, как будет показано ниже, удачно расположены для решения подобных задач.

Зона VI Кларка

В середине XX в. было установлено, что послеледниковая трансгрессия, особенно на завершающем этапе, позднее 6 тыс. л.н., имела неодинаковый сценарий и неравномерную скорость наступления моря в различных районах Мирового океана.

Базовыми рассматривались сценарии Ф. Шепарда и Р. Фейрбриджа. Шепард [Шепард, 1969] предполагал плавное повышение уровня моря, которое, по асимптоте, достигло современного уровня, но никогда не превышало его. Его оппонент Фейрбридж [Fairbridge, 1961] предложил альтернативное представление о ходе трансгрессии – с осцилляциями. По Фейрбриджу, уровень Мирового океана 5.0 и 3.7 тыс. л.н. превысил современный на 3–4 м, а далее после ряда мелких осцилляций 2.3 и 1.2 тыс. л.н. амплитудой +1.5 м вернулся к уровню близкому современному.

Решение для обсуждаемого противоречия было предложено коллективом исследователей J. Clark et al. [1978]. Они при численном моделировании учли изменения гравитационного поля в результате перераспределения масс льда и воды на поверхности Земли и реологические свойства литосферы и мантийных слоев. Эти авторы также выделили на поверхности Земли зоны со схожими сценариями хода послеледниковой трансгрессии, т.е. зоны, в которых уровень моря превышал современный, зоны, в которых уровень моря понизился, и др. Всего было выделено 6 зон. В дальнейшем, на основе этой работы, моделирование совершенствовалось.

Своеобразной зоной среди выделяемых оказалась зона VI Кларка, в которую вошли материковые побережья. На протяженных материковых побережьях по всему миру были зафиксированы превышения современного уровня моря, в основном совпадавшие по времени с климатическим оптимумом голоцена около 6 тыс. л.н.

В других зонах, особенно в зоне IV Кларка, расчеты, наоборот, показали океаническое понижение уровня (zone-IV oceanic submergence) и отсутствие превышений современного уровня моря в голоценовый климатический оптимум [Clark et al., 1978].

Другой особенностью, влияющей на изменение относительного уровня моря на конкретных побережьях и маскирующей эффект зоны VI Кларка, оказалось появление своеобразных вздутий – форбалдж (forebuldge) (зона II Кларка [Clark et al., 1978]), образовавшихся на земной поверхности по периметру областей покровных ледников в период максимума покровного оледенения (last glacial maximum – LGM). Появление вздутий объяснялось растеканием вещества вязких мантийных слоев из-под области оледенения под тяжестью ледника [Glacial..., 2009]. Такие вздутия по мере таяния ледников компенсировались, поверхность понижалась в своих высотных отметках, и этот процесс на побережьях фиксируется в древних береговых линиях.

Для изучения эффекта зоны VI Кларка удобно побережье, достаточно удаленное как от областей непосредственного развития ледниковых покровов (чтобы уйти из зоны форбалдж), так и от современных активных регионов вроде Курило-Камчатской зоны субдукции.

В этом отношении подходящим районом является побережье морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Моря находятся не только за пределами областей последнего покровного оледенения, как Фенноскандии, так и Северо-Американского, но и за пределами распространения связанных с ними зон форбалдж. Современные активные зоны субдукции также не доминируют в этом регионе.

Особенностью моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, удобной для изуче-

ния эффекта леверинга (continental levering) [Stocchi, Spada, 2007] в голоценовый оптимум, является различная ширина шельфов этих морей. Шельф моря Лаптевых – около 500 км – в два раза уже шельфа Восточно-Сибирского моря. При этом шельф Восточно-Сибирского моря до половины своей ширины имеет глубины от 100 м и свал глубин континентального склона примерно на 500 метрах, а у моря Лаптевых эта зона гораздо уже.

Послеледниковые изменения уровня моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря по палеогеографическим данным

Побережья морей Лаптевых и Восточно-Сибирского изучены палеогеографическими методами в отношении послеледниковой трансгрессии слабо. Это связано прежде всего с труднодоступностью региона. Более детально изучено побережье моря Лаптевых.

Послеледниковая трансгрессия на побережье моря Лаптевых характеризуется повышением уровня моря в период с 9 до 6 тыс. л.н.,



Рис. 1. Батиметрическая карта-схема до изобаты 2000 м шельфа и континентального склона моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря (https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi). Залитые квадраты – участки, по которым смоделированные кривые хода послеледниковой трансгрессии (рис. 2) обсуждаются в статье.

после чего уровень стабилизировался. Имеются разрозненные сведения о превышении современного уровня моря в голоцене. Среди них интересные свидетельства проникновения морской воды в прибрежные озера, расположенные выше современного уровня в последние 2000 лет. В качестве примера подобного превышения современного уровня моря приводятся оз. Изменчивое на архипелаге Северная Земля у п-ова Таймыр и оз. Севастьян в районе дельты р. Лена. Озера располагаются на 6 и 5 м соответственно выше современного уровня моря, и, как оценивают исследователи, уровень моря около 2000 л.н. должен был превышать современный не менее чем на 10 м, о чем «...свидетельствует возраст погребенной озерными отложениями древесины – 2100 радиоуглеродных лет [Большиянов и др., 1995]» (цит. по: [Макаров, 2017, с. 87]).

Анализ топографических карт XIX в. [Большиянов и др., 2013] показал, что уровень моря мог располагаться выше современного, возможно, всего 150–200 л.н.

B работе. посвященной изменениям уровня моря Лаптевых в послеледниковье, А.В. Гаврилов и др. [2006] по данным бурения скважин на шельфе и датировок древних береговых следов деятельности моря на побережьях реконструировали схемы расположения береговой линии в зависимости от возраста и кривую хода морской трансгрессии. Особенную роль при наступлении моря авторы отвели термоабразии и термокарстовым явлениям. Для периода голоценовой трансгрессии они пришли к выводу, что в период 5–3.5 тыс. л.н. уровень достигал абсолютных отметок 0..., +2, +3 м, а около тысячелетия назад – отметок +1, +2 м.

А.В. Баранская [2015], по результатам анализа датировок позднеплейстоценовых и голоценовых поднятых или затопленных береговых линий, предложила для шельфовой области моря Лаптевых, выделенной по критериям неотектонической активности, осредненную для крупных неотектонических областей скорость относительного изменения уровня моря за голоцен в 5.5 мм/год. Любопытно, что в смежной тектонической области, Верхоянской, расположенной частично на современной сухопутной части побережья моря Лаптевых, относительное изменение уровня моря за голоцен имеет противоположное направление, и оценено оно в -1.41 мм/год [Баранская, 2015].

Послеледниковые изменения уровня моря на побережье Восточно-Сибирского моря изучены еще меньше, чем на побережье моря Лаптевых. Для Восточно-Сибирского моря практически отсутствуют прямые оценки изменений уровня моря в послеледниковое время [Макаров, 2017]. Имеются данные по Новосибирским островам. По результатам документирования серии морских террас, датированных радиоуглеродным методом, и находки плавника из верхней части разреза отложений лайды на высоте 8 м предложена кривая изменений уровня моря в районе о. Жохова в голоцене [Анисимов и др., 2009]. Согласно этой кривой, уровень моря превышал современный около 4-4.9 тыс. л.н. на 6-8 м, около 1.2 тыс. л.н.- на 4-6 м. Авторы цитируемой работы предполагают значительный темп трансгрессии на начальном этапе на основании находок бивней мамонтов возрастом 12.5 тыс. лет в 130 км к северо-западу от о. Жохова, где преобладают глубины более 20 м. Датировка плечевой кости лошади с о. Вилькицкого, расположенного в 45 км к юго-западу от о. Жохова, позволила предположить, что о. Жохова сохранял связь с материком еще 7–9 тыс. л.н. [Анисимов и др., 2009]. Замедление трансгрессии связывают с тем, что происходило не трансгрессивное затопление, а постепенный захват суши морем в результате термической переработки многолетнемерзлых пород.

В фундаментальном труде П.А. Каплин и А.О. Селиванов [1999] на основе анализа выполненных к тому времени палеогеографических исследований склоняются к выводу, что на побережьях морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в оптимум голоцена уровень моря был близок к современному или превышал его не более чем на 1.5–3.0 м. А отмеченные превышения современного уровня моря на более высокие, до 10 м, значения обусловлены высокими штормовыми нагонами [Каплин, Селиванов, 1999].

Таким образом, в настоящее время пока недостаточно палеогеографических наблюдений о ходе послеледниковой трансгрессии, на которые можно опираться. Но предварительные результаты позволяют допустить, что ход трансгрессии на море Лаптевых и Восточно-Сибирском море был различен.

А.С. Макаров и Д.Ю. Большиянов [2011] отмечают, что ход уровня океана в течение голоцена в восточном и западном секторе российской Арктики различен и часто разнонаправлен. Для морей восточного сектора характерен трансгрессивный характер, а для морей западного сектора – регрессивный.

На различие в ширине шельфа и влиянии этой особенности на ход послеледниковой трансгрессии обратили внимание V. Klemann et al. [2015]. По результатам моделирования авторы оценили ход трансгрессии для рассматриваемых регионов в широком диапазоне реологических параметров мантийных слоев и мощности литосферы. По их данным, на шельфе Восточно-Сибирского моря благодаря эффекту гидроизостазии прогнозный ход уровня моря систематически опережал на 10–15 м ход трансгрессии при учете только эвстатической ее доли. Сравнение лаптевоморского шельфа с более крутым склоном шельфа Восточно-Сибирского моря показало, что вертикальные движения земной поверхности различались в ходе послеледниковой трансгрессии. Изгиб литосферы под Восточно-Сибирским морем начался мористее, чем под морем Лаптевых.

Результаты численного моделирования и обсуждение

Расчеты хода послеледниковой трансгрессии, выполненные в программном пакете SELEN 2.9 [Spada, Stocchi, 2006, 2007; Spada et al., 2012] (рис. 2) при различных реологических параметрах мантийных слоев, показали в общем случае для побережья Восточно-Сибирского моря превышение современного уровня моря, а для побережья моря Лаптевых отставание хода трансгрессии и практическое отсутствие превышения над современным уровнем моря.

Объяснение данного факта кроется в различии влияния эффекта гидроизостазии на более широком шельфе Восточно-Сибирского моря в сравнении с относительно узким шельфом моря Лаптевых.



Рис. 2. Кривые хода трансгрессии для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в зависимости от выбранной вязкостной модели Земли согласно таблице. Пункты, для которых приводятся кривые хода трансгрессии, показаны залитыми квадратиками на рис. 1. Для обоих морей пункты выбраны в заливах, чтобы избежать различия хода трансгрессии на мысу и в заливе.

Слой Земли	Мощность литосферы и значения вязкости слоев мантии				
	VM2a	VM2c	VM2e	VM2f	
Литосфера, км	50	50	50	50	
Верхняя мантия, 10 ²¹ Па·с	0.5	1.0	0.75	0.35	
Транзитный слой, 10 ²¹ Па∙с	0.5	1.0	0.75	0.35	
Нижняя мантия, 10 ²¹ Па·с	2.7	10	3.5	2.0	

Таблица. Модели Земли, использованные в расчетах

Примечание. За основу взяты параметры модели VM2a, предложенные [Peltier, 1998] для моделирования восстановления изостатического равновесия в результате изменения объема покровных оледенений (glacial isostatic adjustment – GIA).

Согласно представлениям J. Clark и C. Lingle [1979], при регрессии моря во время максимума последней ледниковой эпохи снятие нагрузки воды вызывает перетекание мантийного вещества из-под континента в район шельфа и океанического дна. Это вызывает нисходящие движения прибрежной зоны континента. Затем, с наступлением межледникового времени, по мере наполнения чаши морского бассейна талой водой ледников, водная нагрузка на морское дно и шельф увеличивается, что ведет к возврату мантийного вещества в область под континентом, и береговая зона начинает подъем. Процесс этот зависит от вязкости мантийного вещества: чем выше вязкость, тем больше времени требуется для перетекания (рис. 3).

На рис. 3 представлены кривые релаксации, рассчитанные в программном пакете SELEN 2.9 [Spada, Stocchi, 2006, 2007; Spada et al., 2012] по методике, предложенной [Peltier, 1976]. Кривые отображают зависимость времени возврата к равновесному состоянию после воздействия и снятия нагрузки на планетарные слои Земли.

По кривым релаксации видно, что при наибольшей вязкости мантийного вещества (модель VM2c, рис. 3а) время релаксации



Рис. 3. Спектры изостатической релаксации в земных слоях по результатам моделирования в программном пакете SELEN 2.9, полученные для моделей VM2c (а) и VM2e (b). Кривая M0 соответствует мантии, C0 – границе ядра и мантии, L0 – литосфере, M1 и M2 соответственно мантийным границам 670 и 470 км, T1–T4 – слоям с упруго-вязким поведением.

слоев увеличивается практически на половину порядка в сравнении с моделью с наименьшей вязкостью (модель VM2e, рис. 3b), т.е. требуется в несколько раз более продолжительное время, чтобы земная поверхность вернулась к изостатически сбалансированному равновесию.

В случае рассматриваемых морей нагружение морского дна в районе континентального склона и шельфа в Восточно-Сибирском море будет происходить с меньшей нагрузкой благодаря очевидной большей ширине и, соответственно, большей площади шельфа в сравнении с шельфом моря Лаптевых, что замедлит возврат мантийного вещества под область континента на побережье Восточно-Сибирского моря. Запаздывание возврата мантийного вещества под континентальную область вызовет запаздывание подъема побережья, и море оставит следы береговой деятельности на отметках, которые позже будут подняты при достижении изостатического равновесия. В результате следы уровня моря в период достижения максимума эвстатической трансгрессии (в нашем случае 4 тыс. л.н.) окажутся выше современного уровня моря.

Данный механизм подтверждается результатами моделирования (рис. 2).

Превышения современного уровня моря на Восточно-Сибирском побережье показывают кривые с низкими значениями вязкости мантийного вещества. Низкие значения вязкости обусловливают гидроизостатическую компенсацию, вследствие чего древние следы уровня моря отмечаются выше современного уровня. При высоких же значениях мантийной вязкости, как показывают расчеты, превышения современного уровня моря отсутствуют и на побережье Восточно-Сибирского моря (рис. 2b, VM2c).

Отсутствие достаточных данных о ходе послеледниковой трансгрессии на побережье Восточно-Сибирского моря по палеогеографическим наблюдениям с абсолютными датировками не дает возможности отдать предпочтение какой-то из использованных вязкостных моделей, но если для побережья Восточно-Сибирского моря процесс гидроизостатической компенсации еще не закончился (при низкой вязкости в сегменте мантии), то можно ожидать, что осушение побережья и отступление моря может оказаться ведущим процессом в ближайшем будущем.

Заключение

Уникальное расположение по отношению к областям развития покровных оледенений и большая разница в ширине шельфа и континентального склона моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря позволяют по результатам численного моделирования подтвердить наличие эффекта continental levering для континентальных побережий и его зависимость от ширины шельфа и континентального склона.

Очевидно, что необходимо продолжение сбора палеогеографических данных о ходе послеледниковой трансгрессии на побережьях и шельфе этих морей. При наличии достаточных данных, особенно с побережья Восточно-Сибирского моря, сравнительное моделирование позволило бы более точно определить реологические свойства земных слоев, а также точнее прогнозировать и реконструировать сценарий послеледниковой трансгрессии и его зависимость от изменения объема покровных ледников.

Список литературы

1. Анисимов М.А., Иванова В.В., Пушина З.В., Питулько В.В. **2009.** Лагунные отложения острова Жохова: возраст, условия формирования и значение для палеогеографических реконструкций региона Новосибирских островов. *Известия РАН, Серия географическая*, 5: 107–119.

2. Баранская А.В. **2015.** *Роль новейших вертикальных тектонических движений в формировании рельефа побережий российской Арктики*: дис. ... канд. геогр. наук. СПб.

3. Большиянов Д.Ю., Макеев В.М. **1995.** Архипелаг Северная Земля. Оледенение, история развития природной среды. СПБ.: Гидрометеоиздат, 217 с.

4. Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. **2013.** *Происхождение и развитие дельты р. Лены.* СПб.: ААНИИ, 268 с.

5. Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В. **2006.** Палеогеографический сценарий послеледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых. *Криосфера Земли*, 10(1): 39–50. 6. Каплин П.А., Селиванов А.О. **1999.** Изменение уровня морей России и развитие берегов: проилое, настоящее, будущее. М.: ГЕОС, 299 с.

7. Макаров А.С. **2017.** *Колебания уровня арктических морей в голоцене*: дис. ... д-ра геогр. наук. СПб.

8. Макаров А.С., Большиянов Д.Ю. **2011.** Колебания уровня арктических морей России в голоцене. В кн.: *Проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена*, 3. М.: Географический факультет МГУ, с. 315–320. http://www.aari.ru/misc/publicat/paa/PAA-109/101-110.pdf

9. Шепард Ф.П. **1969.** *Морская геология*. Л.: Недра, 462 с.

10. Clark J., Lingle C. **1979.** Predicted relative sea-level changes (18000 Years B.P. to present) caused by Late-Glacial retreat of Antarctic Ice Sheet. *Quaternary Research*, 11: 279–298. https://doi.org/10.1016/0033-5894(79)90076-0

11. Clark J., Farrell W., Peltier W. **1978.** Global changes in postglacial sea level: Numerical calculations. *Quaternary Research*, 9(3): 265–287. https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90033-9

12. Fairbridge R. **1961.** Eustatic changes in sea level. *Physics and Chemistry of the Earth*, 4: 99–185. https://doi.org/10.1016/0079-1946(61)90004-0

13. Klemann V., Heim B., Bauch H.A., Wetterich S., Opel T. **2015.** Sea-level evolution of Laptev Sea and East Siberian Sea since the last glacial maximum. *Arktos*, 1: 1(2015).

https://doi.org/10.1007/s41063-015-0004-x

14. Peltier W.R. **1976.** Glacial-Isostatic adjustment – II. The inverse problem. *Geophysical J. of the Royal Astronomical Society*, 46: 669–705.

15. Peltier W.R. **1998.** Postglacial variations in the level of the sea: Implications for climate dynamics and solid-Earth geophysics. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 603–689. https://doi.org/10.1029/98rg02638

 Spada G., Stocchi P. 2006. The sea level equation: Theory and numerical examples. Roma: Aracne, 96 p.
Spada G., Stocchi P. 2007. SELEN: A Fortran 90 program for solving the "sea-level equation". Computers and Geosciences, 33(4): 538–562. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.08.006

18. Spada G., Sabadini R., Yuen D.A, Ricard Y. **1992.** Effects on postglacial rebound from the hard rheology in the transition zone. *Geophysical J. International*, 109(2): 683–700. doi:10,1111/j.1365-246X.1992.tb00125.x.

19. Spada G., Melini D., Galassi G., Colleoni F. **2012.** *Modeling sea level changes and geodetic variations by glacial isostasy: the improved SELEN code*. http://arxiv.org/abs/1212.5061

20. Stocchi P., Spada G. **2007.** Glacio and hydro-isostasy in the Mediterraneon Sea: Clark's zones and role of remote ice sheets. *Annals of Geophysics*, 50(6). https://doi.org/10.4401/ag-3054

21. Whitehouse P. 2009. Glacial isostatic adjustment and sea-level change: State of the art report. *Technical Report*, TR-09-11.

Сведения об авторах

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

АФАНАСЬЕВ Виктор Викторович (ORCID 0000-0002-2344-1269), кандидат географических наук, заведующий лабораторией береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, vvasand@mail.ru

УДК 551.248.2,551.89

TRANSLATION https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.305-312.313-320

Effect of hydroisostatic compensation depending on the shelf width on the example of the Laptev and the East Siberian seas

Rustam F. Bulgakov*, Victor V. Afanas'ev

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

Abstract. Using the method of numerical simulation, we found the nature of the postglacial transgression along the coasts of the Laptev and East Siberian seas to be affected by the shelf width and the continental slope depending on the viscosity properties of mantle layers. In particular, the marks exceeding the contemporary sea level, which are typical for the Holocene climatic optimum of 4–6 ka BP, may be located at different heights. Depending on the area, which fell under the increasing load of the incoming water due to the sea level rise during the postglacial period, and the viscosity of the mantle layers, the earth's surface responds differently to changes in the load and restores its isostatic balance with different rates.

Keywords: postglacial transgression, mantle viscosity, hydroisostasy, vertical movements, Lapteva Sea, East Siberian Sea

For citation: Bulgakov R.F., Afanas'ev V.V. Effect of hydroisostatic compensation depending on the shelf width on the example of the Laptev and the East Siberian seas. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 305–320. (Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.305-312.313-320

Introduction

During the Holocene climatic optimum, 4–6 ka BP, by a global temperature regime exceeding the present-day climatic temperature, it is logical to expect additional degradation of the ice sheets volume with the transition of melt water to the World Ocean and, as a result, an excess of the contemporary sea level. Indeed, the traces of uplifted coastlines are found on many coasts of the World Ocean.

The probable oscillations of the eustatic sea level resulting from the relative decrease or increase of the ice sheets volume due to the climatic fluctuations are not taken into account when numerical solutions of the so-called sea level equation (SLE) are performed in the scenarios of the ice sheets melting. The glaciers melting is taken as occurring according to the asymptotic law with completion of degradation of the Antarctic ice sheet about 4 ka BP.

Nevertheless, the simulation showed an excess of the sea level within the period of 4–6 ka BP for many coasts. Such zones were named Clark's Zone VI.

In the present work, we make an attempt to study this phenomenon exemplified by the coasts of the Laptev and East Siberian seas, which are well located for such problems solving.

Clark's zone VI

In the middle of the XX century, it was founded, that the postglacial transgression, especially at the ending stage, later than 6 ka BP, had different scenarios and uneven rate of sea advance in various areas of the World Ocean.

F. Shepard and R. Fairbridge scenarios were considered as basic. Shepard [1969] assumed

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Булгаков Р.Ф., Афанасьев В.В. Эффект гидроизостатической компенсации в зависимости от ширины шельфа на примере моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. *Translation by G.S. Kachesova*.

a gradual rise of sea level reached the present meaning by the asymptote, but never exceeded it. His opponent, Fairbridge [1961] proposed an alternative conception of oscillations presence in the transgression course. According to Fairbridge, the World Ocean level has exceeded the present one by 3–4 m 5.0 and 3.7 ka BP, and then returned to the meaning close to the present after a series of small oscillations with an amplitude of 1.5 m 2.3 and 1.2 ka BP.

The solution for the discussed contradiction was offered by the J. Clark et al. [1978]. In numerical simulation, they took into account changes in the gravity field resulting from redistribution of ice and water masses on the Earth's surface and rheological properties of the lithosphere and mantle layers. These authors also identified six zones with similar scenarios of the postglacial transgression on the Earth's surface, i.e., the zones where the sea level had exceeded the present one, the zones, in which it had decreased, etc. Six zones

were identified in total. Further, the simulation was improved on the base of this work.

Clark's zone VI, which includes continent coasts, has turned out to be a peculiar zone among the identified ones. The excesses of the contemporary sea level, which were simultaneous with the Holocene climatic optimum of about 6 ka BP, were recorded all over the world on the extended continent coasts.

In other zones, especially in Clark's zone IV, on the contrary, estimations showed oceanic level decrease (zone IV oceanic submergence) and absence of an excess of the contemporary sea level during the Holocene climatic optimum [Clark et al., 1978].

Another feature, affecting the changes in the relative sea level on the certain coasts and masking the effect of Clark's zone VI, was the appearance of forebulges, or Clark's zone II [Clark et al., 1978], formed on the Earth's surface along the perimeter of ice sheets areas during the last glacial maximum (LGM). The forebulges appearance was explained with the spreading of viscous mantle layers from under the glaciated area under the weight of a glacier [Glacial..., 2009]. As the glaciers melted, such bulges were compensated, bench marks of the surface dropped, and this process at the coasts was recorded in the ancient coastlines.

The coast, which is remote enough both from the areas of direct formation of the ice sheets (to leave a forebulge zone) and from the modern active regions like Kuril-Kamchatka subduction zone, is convenient to study the effect of Clark's zone VI.

In this respect, a suitable area is the coast of the Laptev and the East Siberian seas. The seas are located not only outside the regions



Figure 1. Bathymetric schematic map up to 2000 m isobath of the shelf and continental slope of the Laptev and the East Siberian seas (https://topex.ucsd. edu/cgi-bin/get_data.cgi). The areas, on which the simulated curves of the post-glacial transgression course are discussed in the article (Fig. 2), are marked with black squares.

of the last glaciation, both of Fennoscandia and the North American, but also outside the distribution of the associated forebulge zones. The contemporary active subduction zones also do not dominate in this region.

The feature of the Laptev and the East Siberian seas, which is convenient to study the effect of continental levering [Stocchi, Spada, 2007] during the Holocene optimum, is a different width of the shelves of these seas. The Laptev Sea shelf, which is about 500 km, is half as wide the East Siberian Sea ones. At the same time, the shelf of the East Siberian Sea has depths from 100 m up to half of its width, and the shelf break of the continental slope occurs at about 500 m, this zone in the Laptev Sea is much narrower.

Postglacial changes in the level of the Laptev and the East Siberian seas according to the paleogeographic data

The coasts of the Laptev and the East Siberian seas have been poorly studied using paleogeographic methods in respect of postglacial transgression. This primarily conditioned by inaccessibility of the region. The Laptev Sea coast is studied in more details.

Postglacial transgression at the Laptev Sea coast is characterized with the sea level increase in the period from 9 to 6 ka BP followed by its stabilization. There is scattered information about an excess of the contemporary sea level during the Holocene. There are interesting evidences of sea water penetration into the coastal lakes located above the contemporary level during the last 2000 years among them. Such an excess of the contemporary sea level is exemplified with Izmenchivoye Lake in the Severnaya Zemlya archipelago near the Taymyr Peninsula, and Sevastian Lake in the area of the Lena River delta. The lakes are located on 6 and 5 m above the contemporary sea level, respectively, and, according to the researchers assessments, the sea level at about 2000 years ago should exceed the contemporary one not less than 10 m, as "...evidenced by the age of wood buried by lake sediments - 2100 radiocarbon years [Bol'shiyanov et al., 1995]" (quoted in: [Ma-karov, 2017, p. 87]).

The analysis of topographical maps of the XIX century [Bol'shiyanov et al., 2013] showed that the sea level could be located higher than the contemporary one, possibly just 150-200 years ago. In the work devoted to the changes in the Laptev Sea level during the postglacial period, A.V. Gavrilov et al. [2006] reconstructed the schemes of the coastline location depending on the age and the curve of the sea transgression course using the data of well drilling at the shelf and dating of ancient coastal traces of the sea activity on the coasts. The authors assigned a special part to thermal abrasion and thermokarst phenomena during the sea transgression. For the Holocene transgression period, they came to a conclusion that the level reached the absolute marks of 0..., +2, +3 m during the period of 5-3.5 ka BP, and the marks were +1, +2 m at about 1000 years ago.

Based on the results of analysis of the dating of the Late Pleistocene and Holocene raised or submerged coastlines, A.V. Baranskaya [2015] proposed an averaged for large neotectonic areas rate of the relative change of the sea level for the Holocene to be 5.5 mm/year for the shelf area of the Laptev Sea, identified according to the criteria of neotectonic activity. It is interesting that the relative change in the sea level during the Holocene has an opposite direction and is estimated at -1.41 mm/year in the Verhoyanskaya adjacent tectonic area partly located on the current onshore part of the Laptev Sea coast [Baranskaya, 2015].

Postglacial changes in the sea level at the coast of the East Siberian Sea are studied even less than at the Laptev Sea coast. There are practically no direct assessments of the sea level changes during the postglacial period [Makarov, 2017]. There are data on the New Siberian Islands. The curve of the sea level changes in the area of Zhokhov Island during the Holocene is proposed based on the results of documenting of the marine terraces series, dated by the radiocarbon method, and the driftwood finds from the upper part of the section of laida deposits at a height of 8 m

[Anisimov et al., 2009]. In accordance with this curve, the sea level exceeded the contemporary one about 4-4.9 ka BP by 6-8 m, and by 4-6 m - about 1.2 ka BP. The authors of the cited work assume a significant rate of transgression at the initial stage on the ground of the finds of mammoth tusks with an age of 12.5 ka BP 130 km northwest of Zhokhov Island, where depths of more than 20 m prevail. Dating of horse humeral from Vilkitsky Island, located 45 km southwest of Zhokhov Island, allowed to suppose that Zhokhov Island had kept a connection with the continent as far back as 7-9 ka BP [Anisimov et al., 2009]. The transgression deceleration is associated with the fact that not a transgressive submergence has been occurring, but a gradual sea encroachment of the land resulting from thermal changes of the permafrost rocks.

In their fundamental work, P.A. Kaplin and A.O. Selivanov [1999], based on the analysis of already fulfilled paleogeographic studies, lean towards a conclusion that during the Holocene optimum, the sea level at the coasts of the Laptev and the East Siberian seas has been close to the contemporary one or exceeded it by not more than 1.5–3.0 m. And recorded excesses of the contemporary sea level by higher values up to 10 m are conditioned by high storm surges [Kaplin, Selivanov, 1999].

Thus, there are not enough paleogeographic observations of the postglacial transgression course, on which one can rely. However, the preliminary results allow us to assume that the transgression course on the Laptev and the East Siberian seas was different.

A.S. Makarov and D.Yu. Bol'shiyanov [2011] note that the course of the ocean level during the Holocene in the eastern and western sectors of the Russian Arctic is different and often multidirectional. The seas of the eastern sector are characterized with a transgressive character, while the seas of the western sector are characterized with a regressive character.

V. Klemann et al. [2015] paid attention to the difference in shelf width and this feature influence on the postglacial transgression course. Based on the simulation results, the authors estimated the transgression course for the studied regions in a wide range of rheological parameters of the mantle layers and the thickness of the lithosphere. According to their data, on the shelf of the East Siberian Sea, due to the effect of hydroisostasy, the predicted course of the sea level systematically kept ahead of the course of transgression by 10–15 m, taking into account only its eustatic part. Comparison of the Laptev Sea shelf with the steeper slope of the East Siberian Sea shelf showed the vertical movements of the earth's surface to be different during the postglacial transgression. The lithosphere bend under the East Siberian Sea began more seaward than under the Laptev Sea.

Numerical simulation results and discussion

Computations of the postglacial transgression course, which were performed in the SELEN 2.9 software suite [Spada, Stocchi, 2006, 2007; Spada et al., 2012] (Fig. 2) at various rheological parameters of the mantle layers, generally showed an excess of the contemporary sea level for the coast of the East Siberian Sea, and the lagging of the transgression course and near absence of an excess above the contemporary sea level for the coast of the Laptev Sea.

This fact is explained by the difference in the influence of the hydroisostasy effect on the wider shelf of the East Siberian Sea in comparison with the relatively narrow shelf of the Laptev Sea.

According to J. Clark and C. Lingle [1979], the water load removal causes the overflow of the mantle substance from under the continent to the shelf and ocean floor area when the sea regression during the maximum of the Last Glacial Period. This induces downward movements of the continent coastal zone. Then, when an interglacial period come, as the sea basin fills with melt water from glaciers, the water load on the seabed and shelf increases, which leads to the return of mantle substance to the area under the continent, and the coastal zone begins to rise. This process depends on the viscosity of the mantle substance: the higher the viscosity, the longer it takes for the overflow (Fig. 3).

Figure 3 shows the relaxation curves computed using the SELEN 2.9 software [Spada, Stocchi, 2006, 2007; Spada et al., 2012] according to the method proposed by [Peltier, 1976]. The curves represent the dependence of the recovery time to the equilibrium state after the influence and the removal of the load on the planetary layers of the Earth. The relaxation curves show that at the highest viscosity of the mantle substance (model VM2c, Fig. 3 a), the relaxation time of the layers increases by almost half an order of magnitude in comparison with the model with the lowest viscosity (model VM2e, Fig. 3 b); it takes by several times longer for the earth's surface to return to isostatically balanced equilibrium.

In the case of the studied seas, the loading on the seabed in the area of the continental slope and shelf in the East Siberian Sea will go on with a lower load due to the obvious wider



Figure 2. Curves of the transgression course for the Laptev and the East Siberian seas depending on selected viscosity model of the Earth in accordance with the Table. The points, for which the curves of the transgression course are given, are shown with black squares in the Figure 1. For both seas, the points are chosen inside the bays to avoid the difference in transgression scenario at the cape and in the bay.

Earth's layer	Lithosphere thickness and viscosity values of the mantle layers				
	VM2a	VM2c	VM2e	VM2f	
Lithosphere, km	50	50	50	50	
Upper mantle, 10 ²¹ Pa·s	0.5	1.0	0.75	0.35	
Transition layer, 10 ²¹ Pa·s	0.5	1.0	0.75	0.35	
Lower mantle, 10 ²¹ Pa·s	2.7	10	3.5	2.0	

Table. Earth models used in computations

Note. The parameters of the VM2a model proposed [Peltier, 1998] for modeling the restoration of isostatic equilibrium resulting from the changes in the volume of ice sheets (glacial isostatic adjustment – GIA) are taken as a basis.

width and a larger shelf area, correspondingly, in comparison with the shelf of the Laptev Sea, that will slow down the return of the mantle substance under the continental region at the coast of the East Siberian Sea. A delay in the return of mantle substance under the continental region will cause a lag in the rise of the coast, and the sea will leave the traces of coastal activity at the heights, which will be uplifted later, when the isostatic equilibrium is reached. As the result, the sea level traces during the period of reaching the eustatic transgression maximum (4 ka BP in our case) will be higher than the contemporary sea level.

This mechanism is confirmed by the simulation results (Fig. 2).

The curves with low values of the viscosity of the mantle substance show the excesses of the contemporary sea level at the East Siberian coast. Low viscosity values cause the hydroisostatic compensation, resulting in the ancient traces of the sea level being noted above modern levels. As for high values of mantle viscosity, as the computations show, there are



Figure 3. Isostatic relaxation spectra within the earth's layers according to the results of simulation in the SELEN 2.9 software, obtained for the VM2c (a) and VM2e (b) models. M0 corresponds to the mantle, C0 - to the core-mantle boundary, L0 - to the lithosphere, M1–M2 – to the borders of 670 and 470 km respectively, T1–T4 – to the layers with viscoelastic behavior.

no excesses of the contemporary sea level at the coast of the East Siberian Sea too (Fig. 2 b, VM2c).

The lack of sufficient data on the course of the postglacial transgression on the coast of the East Siberian Sea, based on the paleogeographic observations with absolute datings, does not make it possible to give preference to any of the used viscosity models, but if for the coast of the East Siberian Sea the process of hydroisostatic compensation has not yet finished (at low viscosity in the mantle segment), it can be expected that the dewatering of the coast and retreat of the sea may be the leading process in the near future.

Conclusion

The unique location relative to the areas of the ice sheets development and the great dif-

ference in the shelf width and continental slope of the Laptev and the East Siberian seas allow to confirm the presence of the continental levering effect for the continental coasts and its dependence on the shelf width and the continental slope according to the results of numerical simulation.

Obviously, it is necessary to continue the gathering of paleogeographic data on the postglacial transgression course at the coasts and shelves of the studied seas. With the availability of sufficient data, especially from the East Siberian Sea coast, the comparative simulation could allow to determine the rheological properties of the earth's layers more accurately, as well as to make more exact predictions and restore the postglacial transgression scenario and its dependence on the changes in ice sheets volume.

References

1. Anisimov M.A., Ivanova V.V., Pushina Z.V., Pitul'ko V.V. **2009.** Lagoon sediments of Jokhov Island: age, conditions of formation and meanings for paleogeographic reconstructions of the region of New Siberian Islands. *Izvestiia RAN, Ser. Geograficheskaia*, 5: 107–119. (In Russ.).

2. Baranskaya A.V. **2015.** *Rol' noveyshikh vertikal'nykh tektonicheskikh dvizheniy v formirovanii rel'yefa poberezhiy rossiyskoy Arktiki* [*The role of the latest vertical tectonic movements in formation of the relief of the Russian Arctic coasts*]: [Cand. diss. in geographic sciences]. Saint-Petersburg. (In Russ.).

3. Bol'shiyanov D.Yu., Makeyev V.M. **1995.** Arkhipelag Severnaya Zemlya. Oledeneniye, istoriya razvitiya prirodnoy sredy [The Severnaya Zemlya Archipelago. Glaciation, history, environment]. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 217 p. (In Russ.).

4. Bol'shiyanov D.Yu., Makarov A.S., Shnayder V., Shtof G. **2013.** *Proiskhozhdeniye i razvitiye del'ty r. Leny* [*Origin and development of the Lena River delta*]. Saint-Petersburg: AANII, 268 p. (In Russ.).

5. Clark J., Lingle C. **1979.** Predicted relative sea-level changes (18000 Years B.P. to present) caused by Late-Glacial retreat of Antarctic Ice Sheet. *Quaternary Research*, 11: 279–298. https://doi.org/10.1016/0033-5894(79)90076-0

6. Clark J., Farrell W., Peltier W. **1978.** Global changes in postglacial sea level: Numerical calculations. *Quaternary Research*, 9(3): 265–287. https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90033-9

7. Fairbridge R. **1961.** Eustatic changes in sea level. *Physics and Chemistry of the Earth*, 4: 99–185. https://doi.org/10.1016/0079-1946(61)90004-0

8. Gavrilov A.V., Romanovskii N.N., Hubberten H.-W. **2006.** Paleogeographic scenario of the postglacial transgression on the Laptev Sea shelf. *Kriosphera Zemli [Earth cryosphere*], 10(1): 39–50. (In Russ.).

9. Kaplin P.A., Selivanov A.O. **1999.** *Izmeneniye urovnya morey Rossii i razvitiye beregov: proshloye, nastoyashcheye, budushcheye = Sea-level changes and coasts of Russia: past, present, future.* Moscow: GEOS, 299 p. (In Russ.).

10. Klemann V., Heim B., Bauch H.A., Wetterich S., Opel T. **2015.** Sea-level evolution of Laptev Sea and East Siberian Sea since the last glacial maximum. *Arktos*, 1: 1(2015). https://doi.org/10.1007/s41063-015-0004-x

11. Makarov A.S. **2017.** *Kolebaniya urovnya arkticheskikh morey v golotsene* [*Holocene oscillations in the level of the arctic seas*]: [Doctor diss. in geographic sciences]. Saint-Petersburg. (In Russ.).

12. Makarov A.S., Bol'shiyanov D.Yu. **2011.** Kolebaniya urovnya arkticheskikh morey Rossii v golotsene [Holocene oscillations in the level of the Russia arctic seas]. In: *Problemy paleogeografii i stratigrafii pley-stotsena* [*Problems of Pleistocene paleogeography and stratigraphy*], 3. M.: Geograficheskiy fakul'tet MSU [MSU, Faculty of Geography], p. 315–320. (In Russ.)

13. Peltier W.R. **1976.** Glacial-Isostatic adjustment – II. The inverse problem. *Geophysical J. of the Royal Astronomical Society*, 46: 669–705.

14. Peltier W.R. **1998.** Postglacial variations in the level of the sea: Implications for climate dynamics and solid-Earth geophysics. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 603–689. https://doi.org/10.1029/98rg02638

15. Shepard F.P. 1969. Morskaya geologiya [Marine geology]. Leningrad: Nedra, 462 p. (In Russ.).

16. Spada G., Sabadini R., Yuen D.A, Ricard Y. **1992.** Effects on postglacial rebound from the hard rheology in the transition zone. *Geophysical J. International*, 109(2), 683–700.

doi:10,1111/j.1365-246X.1992.tb00125.x.

17. Spada G., Stocchi P. **2006.** *The sea level equation: Theory and numerical examples.* Roma: Aracne, 96 p.

18. Spada G., Stocchi P. **2007**. SELEN: A Fortran 90 program for solving the "sea-level equation". *Computers and Geosciences*, 33(4): 538–562. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.08.006

19. Spada G., Melini D., Galassi G., Colleoni F. **2012.** *Modeling sea level changes and geodetic varia*tions by glacial isostasy: the improved SELEN code. http://arxiv.org/abs/1212.5061

20. Stocchi P., Spada G. **2007.** Glacio- and hydro-isostasy in the Mediterraneon Sea: Clark's zones and role of remote ice sheets. *Annals of Geophysics*, 50(6). https://doi.org/10.4401/ag-3054

21. Whitehouse P. **2009.** Glacial isostatic adjustment and sea-level change: State of the art report. *Technical Report*, TR-09-11.

About the Authors

BULGAKOV Rustam Faridovich (ORCID 0000-0001-9095-3785), Cand. sci. (Geography), researcher of the Laboratory of coastal geosystems, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, r.bulgakov@imgg.ru

AFANAS'EV Viktor Viktorovich (ORCID 0000-0002-2344-1269), Cand. sci. (Geography), head of the Laboratory of coastal geosystems, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, vvasand@mail.ru