

А. В. АМАНТОВ (ВСЕГЕИ),
Л. М. КЭСЛС (Корнеллский университет),
М. Г. АМАНТОВА (ВСЕГЕИ)

Прогибание земной коры в результате развития городов как составная часть геологической угрозы Санкт-Петербурга

Поверхностная нагрузка в результате интенсивного городского развития прибрежных зон может привести к незначительному погружению суши с повышением относительного уровня моря. Опускание существенно зависит от физических свойств литосферы, астеносферы и мантии, а также нагрузки и скорости ее изменения. Рассмотрены величина и площадь антропогенной нагрузки во времени для одного из возможных сценариев развития региона Санкт-Петербурга (2020–2120 гг.) с предварительной оценкой предполагаемых последствий. Быстрая упругая реакция среды и дальнейшее изостатическое прогибание, вызванное техногенными изменениями, могут ускорить будущее затопление самых низких прибрежных территорий, например Санкт-Петербургского региона, и, таким образом, представляют дополнительную геологическую опасность. Скорость и величина упругой и изостатической депрессий являются спорными, так как зависят от различных оценок упругих свойств и эффективной упругой мощности литосферы соответственно.

Ключевые слова: геологические опасности, геодинамика, изостазия, градостроительство, голоцен, прибрежная зона.

A. V. AMANTOV (VSEGEI),
L. M. CATHLES (Cornell University),
M. G. AMANTOVA (VSEGEI)

Crustal subsidence caused by urban development: a component of geological hazard in the Saint-Petersburg region

Surface loading resulted from intense urban development of coastal areas can cause minor land subsidence and relative sea level rise. The subsidence strongly depends on physical properties of the lithosphere, asthenosphere, and mantle, as well the loading and its change rate. The magnitude and area of the urban surface load over time were assessed for one possible scenario of urban expansion in the Saint-Petersburg region (2020–2120) with a preliminary estimation of the potential impact. The immediate elastic response and further isostatic subsidence caused by the urban loading can accelerate future flooding of the lowest coastal regions such as the Saint-Petersburg metropolitan area, and thus represent an additional geological hazard. The rate and magnitude of the elastic and isostatic depression are disputable, since they depend on different estimates of elastic properties and the effective elastic thickness of the lithosphere respectively.

Keywords: geologic hazards, geodynamics, isostasy, urban development, Holocene, coastal zone.

Для цитирования: Амантов А. В., Кэслс Л. М., Амантова М. Г. Прогибание земной коры в результате развития городов как составная часть геологической угрозы Санкт-Петербурга // Региональная геология и металлогения. — 2020. — № 81. — С. 83–96.

Изостазия — важнейший геологический процесс достижения равновесия верхней оболочки Земли за счет различных глубинных изменений, в значительной степени связанных с перераспределением материала астеносферы и мантии. Изостатические движения с течением времени постоянно компенсируют результаты других процессов, нарушающих равновесное состояние. Изостатическая реакция обязательна при относительно продолжительной трансформации любой нагрузки на значительной площади, например при росте и таянии ледниковых щитов (гляциоизостазия), масштабных перераспределениях осадочного материала (седиментоизостазия), водных масс (гидроизостазия), магматических

проявлениях и т. п. Впрочем, подобные вычленения отдельных элементов (компонент) условны и используются обычно лишь для того, чтобы подчеркнуть вклад тех или иных составляющих в конкретных районах, чтобы более точно рассчитать общее изменение нагрузки во времени.

Термин «техногенные изостатические движения» [9] редко используется в литературе, объединяя «положительные и отрицательные вертикальные перемещения земной коры, вызываемые технической деятельностью людей». Известны примеры расчетов и фактических наблюдений релевантных движений с амплитудами в десятки сантиметров в связи с созданием крупных водохранилищ. До настоящего времени не

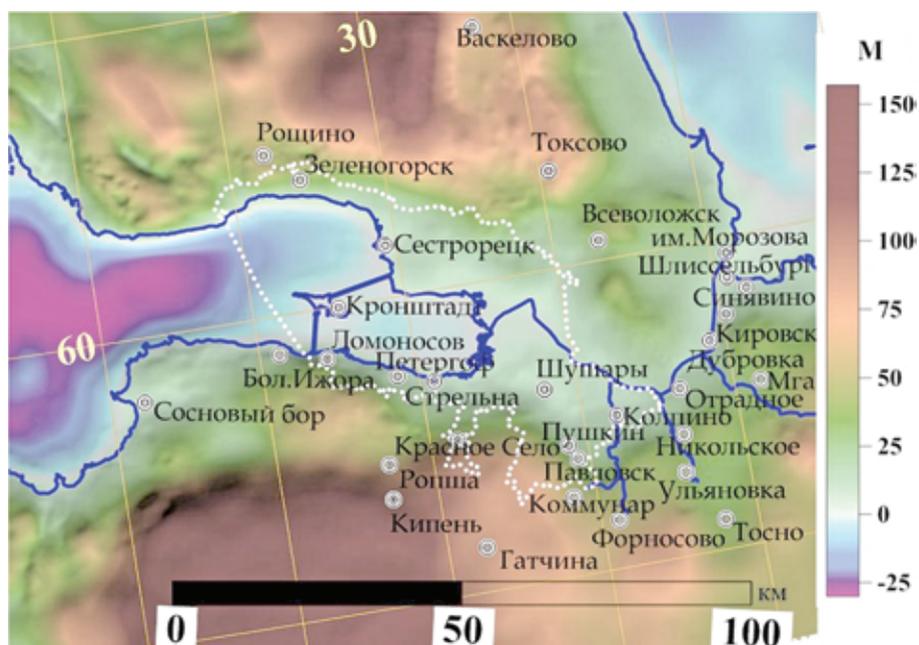


Рис. 1. Район исследований. Граница Санкт-Петербурга показана белой линией точечного пунктира

оценивалось, какой именно количественный вклад в вертикальные движения может внести активное градостроительство и сопутствующая жизнедеятельность человека (техноизостазия городских агломераций – ГА). Поскольку такой фактор может иметь значение при приложении нагрузки на значительных площадях, речь пойдет в первую очередь о крупных и гигантских ГА. В качестве примера упрощенных расчетов мы используем Санкт-Петербургскую агломерацию (СПГА) (рис. 1) со смежными населенными пунктами, для сопоставления напомним о наиболее ярких изученных примерах реальных процессов такого рода. Реакция геологической среды зависит от площади агломераций и их развития во времени, а также региональных реологических параметров, что, несмотря на ряд дискуссионных положений, может оцениваться современным физическим моделированием, апробированным применительно к расчету как быстрых упругих реакций литосферы на изменения нагрузки, так и гляцио-, гидро- и седименто-изостатических движений. Обратная задача уточнения некоторых базовых параметров в благоприятных случаях также может решаться при наличии детального многолетнего мониторинга современных движений и выявления характерных отклонений, вызываемых изменением техногенной нагрузки.

В условиях растущего уровня океана актуально и приоритетно выявление и изучение береговых зон с обширными подтопляемыми территориями, испытывающих абсолютное или относительное погружение. При этом желательно комплементарное прогнозирование тенденций с рекомендациями по минимизации опасных последствий в будущем. Кроме того, проблемы современных движений – важнейшие

в четвертичной геологии бывших ледниково-перигляциальных областей, в связи с чем необходимо количественное определение вклада всех возможных участвующих процессов. Эти проблемы связаны с вопросами изостазии, тектонической активности, эвстатических колебаний уровня океана, палеоклимата, моделирования осадочных бассейнов, гидрогеологии. До настоящего времени продолжают дискуссии о природе и характере движений Балтийско-Беломорской окраины Балтийского (Фенноскандинавского) щита и особенно отклонений от его характерного сводового поднятия. Различно оценивается вклад собственно тектонической компоненты в развитие как региона в целом, так и отдельных фрагментов береговых зон.

Изменения скоростей вертикальных движений во времени под действием всего комплекса факторов, включающих техногенные, могут в ряде случаев усугубить угрозу растущего уровня океана для будущих поколений. К этим факторам относятся и неконтролируемый рост пятен застройки при интенсивном градостроительстве и быстром росте численности населения ГА с накоплением твердых бытовых отходов и их местным захоронением, превращающим территории в крупнейшие мировые депоцентры на единицу площади. Известная проблема эксплуатации подземных вод также опосредованно сопряжена с изменением нагрузки.

Агломерации, безусловно, могут оказывать изостатическое воздействие, несопоставимое с крупными депоцентрами, масштабными интенсивными эрозионными процессами или покровными ледниками значительной мощности и размеров. Однако оценка составляющей отрицательных вертикальных движений в будущем при

дальнейшем увеличении ГА актуальна для таких приморских агломераций, как Санкт-Петербург и Ленинградская область, где техноизостазия может послужить дополнительным фактором серьезных геологических опасностей, ускоряющим подтопление низких прибрежных районов и комплексную трансформацию береговых зон в условиях растущего уровня Мирового океана. Его возможное повышение при сохранении тренда даже по более взвешенным сценариям с исключением аномальных отклонений (вычетом вкладов извержений Пинатубо и эффекта Эль-Ниньо) – 65 ± 12 см к 2100 г. от уровня 2005 г. [36].

Геологическая характеристика местности. СПГА, включая акваторию Невской губы восточной части Финского залива, расположена в краевой зоне Русской плиты на склоне Балтийского кристаллического щита. Пенепленизированная поверхность раннепротерозойского фундамента полого погружается в юго-юго-восточном направлении (с отметками около 200 м в центральной части Санкт-Петербурга), перекрываясь поздневендским плитным чехлом [40].

Породы кристаллического фундамента представлены преимущественно мигматизированными гранат-биотитовыми и другими гнейсами, иногда с линзами амфиболитов, а также интрузивными образованиями, возможно, включая небольшие сателлиты более поздних по отношению к завершающей свекокарельской складчатости массивов рапакиви-габбро-анортозитов, комагматичных Выборгскому плутону. В составе фундамента в небольших отрицательных структурах могут быть встречены образования хогландской серии, формировавшейся на рубеже нижнего-верхнего протерозоя в обстановке масштабных магматических проявлений. Не исключено сохранение эффузивных разностей той же магмы, т. е. рапакиви-анортозитовой формации [1].

Осадочный (плитный) чехол образован отложениями валдайской серии венда (преимущественно эдиакария) и палеозоя (в южной части агломерации), залегающими моноклинально с очень слабым падением в южных направлениях, согласующимся с погружением пенепленизированной поверхности фундамента. Пласты выклиниваются в северном направлении за счет денудационного срезания. Поскольку эксплуатация вендского водоносного комплекса иногда считается одной из причин погружения поверхности, остановимся на описании этой части разреза несколько подробнее. В региональной стратиграфической шкале валдайской серии соответствуют редкинский и котлинский горизонты. Местные стратоны редкинского горизонта – старорусская свита, а котлинского – базальные гдовские слои и василеостровская свита.

Старорусская свита представлена песчаниками, песками, микритами, аргиллитами и аргиллитоподобными глинами, алевролитами. Максимальная мощность соответствующих пород не

превышает 45 м при оценочной скорости распространения упругих колебаний 2300–2500 м/сек.

В качестве гдовских слоев традиционно обозначается нижняя часть котлинского горизонта мощностью до 50 м (обычно около 30 м) с отчетливым преобладанием песчаников и алевролитов, в верхней части встречаются прослойки аргиллитоподобных глин. Василеостровская свита весьма однородна по литологическому составу. Она представлена толщей серовато-голубых гидрослюдистых глин с подчиненными алевритовыми прослоями. Отмечаются частые маломощные прослойки и линзы сидеритовых конкреций. Мощность свиты увеличивается до 150 м в центральной части СПГА.

В субаквальной части вендские отложения практически повсеместно перекрыты четвертичными осадками. Их кровля часто сложно гляциодислоцирована, в нижней части ледниковой моренной толщи присутствуют местные отторженцы вендского чехла. Гляциодислокациям в районе о-ва Котлин обычно подвержено 1–6 м разреза.

Дочетвертичный субстрат определяет многие особенности ландшафта и залегания четвертичных осадков в силу литоморфного характера рельефа. Дочетвертичные образования перекрыты толщей четвертичных отложений мощностью более 100 м в пределах погребенных врезов, где сохранились осадки нескольких оледенений. Морена последнего из них формирует практически сплошной покров. Отложения на о-ве Котлин имеют сероватую и зеленовато-серую окраску. Помимо включений вендского материала присутствуют гальки и крупные валуны (до 2 м в диаметре) кристаллических пород Балтийского щита. Ледниковые отложения перекрываются ледниково-озерными ленточными глинами мощностью в первые метры на возвышенных участках, с увеличением в полигенетических отрицательных формах рельефа.

Рельеф дочетвертичной поверхности о-ва Котлин и Невской губы сформировался в ходе кайнозойской денудации, среди которой в плейстоцене доминировала ледниковая. Наибольшей селективной дифференцированной эрозии подверглись осадочные терригенные породы чехла. Заметим, что специфика крайней восточной части Финского залива заключается в выраженности близширотного простираения в разнопорядковых формах современного и дочетвертичного рельефа. Это косвенно свидетельствует в пользу опосредованного контроля эрозионного рисунка нарушениями рифейского (возможно, верхнерифейско-волынского) возраста, для которых характерна указанная специфическая ориентировка. Также развиты северо-западные и северо-восточные нарушения, причем последнее направление кулисами часто сочетается с субширотным. В осадочном чехле активизированные разрывные нарушения фундамента чаще проявлены флексурами со смещениями до 15 м, но спокойное залегание чехла редко осложнено разломами

и флексурами, несколько чаще наблюдаются незначительные изменения угла регионального наклона моноклинали.

В целом применительно к проявленным в чехле разрывным нарушениям можно отметить:

1) малую амплитуду вертикальных смещений, не превышающую 20, чаще 10–15 м;

2) нелинейность, сегментированность нарушений в плане (либо их проявлений в чехле) и невыдержанность параметров. Местами отмечается преобладание северо-восточного и субширотного простираний, что указывает на общую слабую реактивизацию разломов древнего заложения;

3) восточная часть залива, по данным исследований акватории, вопреки распространенным представлениям [16], не имеет никаких признаков грабена. Его отсутствие отчетливо видно по характеру погружения фундамента, что, впрочем, очевидно и без имеющихся морских геофизических данных из сопоставления глубин залегания фундамента на южном, северном побережьях и в осевой части «грабена» на о-ве Котлин. Однако это не означает, что данная отрицательная форма рельефа имеет лишь денудационную природу. Вполне вероятен избирательный характер денудации, когда положение ряда глубоких погребенных врезов вдоль северного побережья контролируется зоной нарушений. Важно отметить совпадение простирания куты залива с ориентировкой мощной верхнерифейско-волынкой зоны разломов (около 115°), проходящей в 70 км к северу и определившей контуры Вуоксинской рубцовой синклинали в западной части Ладоги [2]. Она является одной из немногих слабоактивизированных в чехле зон, что повлияло и на избирательный характер денудации, возможно, в силу микросейсмической трещиноватости.

Роль неотектонических процессов заключается прежде всего в изостатических послеледниковых движениях Балтийского щита [20; 24; 27; 37] с региональными девиациями за счет местных факторов, к которым, как мы постараемся показать, относится и антропогенный.

Методика исследований. При прогнозе общего изменения рельефа и береговых линий районов, подверженных влиянию изостатических процессов, используется компьютерное физическое моделирование с региональными уточнениями реологических параметров [21; 27; 42]. Физические формулы и принципы расчетов на изменения баланса во времени и пространстве применяются в соответствующих компьютерных кодах [17; 19–21; 23; 25]. Хотя импульс развития моделирование приобрело в результате изучения гляциоизостатических процессов, расчет общего изменения нагрузки не зависит от ее природы, но по значениям плотности осуществляется соответствующий перерасчет.

Существенное влияние дополнительных факторов на ход процесса послеледниковой релаксации, например гидроизостазии, количественно оцененной применительно к Ладожскому озеру

[4; 18], заставляет задуматься о своевременности и необходимости использования полученных наработок при оценке техногенной составляющей изостатических движений.

Ранее мы указывали, что изменение положения земной поверхности определяется рядом геологических процессов, не исчерпывающихся лишь движениями земной коры [3]. При этом изменение нагрузки вызывает упругий (эластичный) быстрый ответ [20] и последующую вязкую реакцию астеносферы и мантии.

Эластичный ответ провоцируют изменения обводнения почв, снегового покрова, колебания уровня грунтовых и поверхностных вод, атмосферные изменения (давление атмосферы на земную поверхность) и другие причины, причем сезонные вертикальные движения земной коры весьма существенны, обычно 4–10 мм и более [39]. Количественные оценки упругой реакции среды обычно обязательно сопровождаются проектированием крупных водохранилищ с последующим контролем моделей прямыми методами. Существует множество примеров такого рода, хотя они не привели к единообразию в подходах [23; 28], что может объясняться и региональной геологической спецификой. При расчетах упругих реакций трудности связаны с определением констант Ламе, где λ – первый параметр Ламе, а μ (модуль сдвига или модуль упругости при сдвиге) – второй параметр Ламе [10]. Например, модели движений земной коры крупнейшего норвежского водохранилища Бласье отличаются прежде всего отсутствием краевого поднятия в береговой зоне при принятом $\lambda = \mu = 0,13 \cdot 10^{11}$ Па [23] либо его прогнозом при $\lambda = 0,41 \cdot 10^{11}$ Па и $\mu = 0,13 \cdot 10^{11}$ Па [28] (рис. 2). Это искусственное озеро интересно размером, площадь зеркала Бласье ~ 0,34 % Ладожского озера (~ 3 % от площади Санкт-Петербурга – см. рис. 1).

Оценки параметров Ламе для основных типов пород и возможные изменения с глубиной известны в научной литературе [29].

Сводные профили глубинного сейсмозондирования в юго-восточной части Балтийского щита показывают, что кристаллическая кора является мозаично-неоднородной средой при глубине до границы М в 39–45 км [15], а это подразумевает отклонения от наших упрощенных расчетных моделей.

Альтернативные эффективные способы количественного определения эластичных деформаций связаны с прогрессом в изучении приливных теорий [22] и применении параметров Лява [11]. На этом основана другая ветка программных решений [35], которая была использована для контроля. Приведены обзор и сопоставление методов [30].

При моделировании процесса прогиба в районе водохранилищ иногда условно принимают, что до глубины 36 км земная кора является твердым упругим телом, а подстилающие ее высокотемпературные горные породы – упругой и одновременно высоковязкой жидкостью [14].

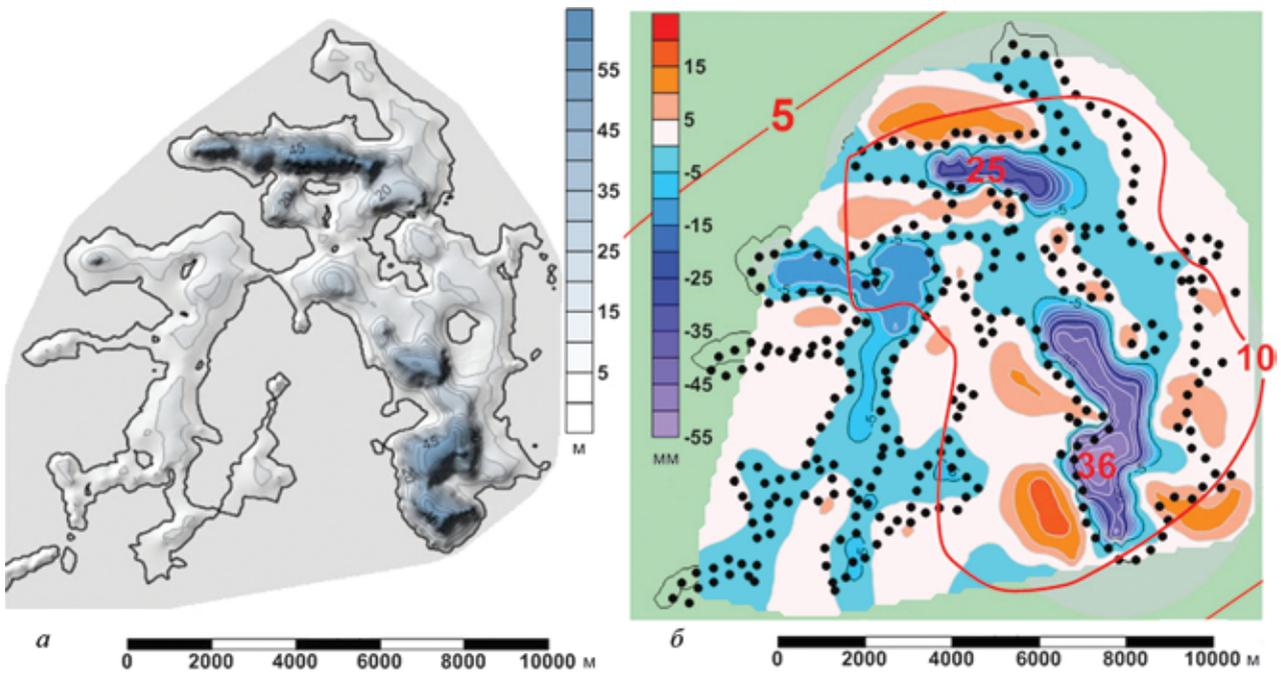


Рис. 2. Частичное заполнение озера Бальсе за 1983–1985 гг. — *a*, сопоставление расчетной упругой реакции по W. Fjeldskaag [23] (красные линии и цифры) и принципов, изложенных Freedен & Michel [28] (цветовая контурная заливка) — *б*

Озеро Мид в Северной Америке — одно из наиболее изученных частой сетью повторных нивелировок водохранилищ. Здесь было выявлено погружение более 20 см за 15 лет [33]. Площадь зеркала Мид ~ 3,6 % от такового Ладожского озера (~ 31 % от площади Санкт-Петербурга — см. рис. 1). Демонстрируя по рисунку вертикальных движений в большей степени упруговязкую, а не упругую реакцию (рис. 3), оно отличается от ряда других. Объяснение этого явления привело к возникновению специфических моделей [31],

предполагающих — при местной эффективной эластичной мощности литосферы (T_e) около 30 км — наличие верхнего десятикилометрового упругого слоя и подстилающего двадцатикилометрового упруговязкого с нижним пределом вязкости около 10^{20} Па/с и подкоровой вязкостью 10^{18} Па/с.

Амплитуда изостатических движений будет принципиально отличаться при различной T_e , так что необходимо ее корректное определение применительно к региону. Помимо традиционных,

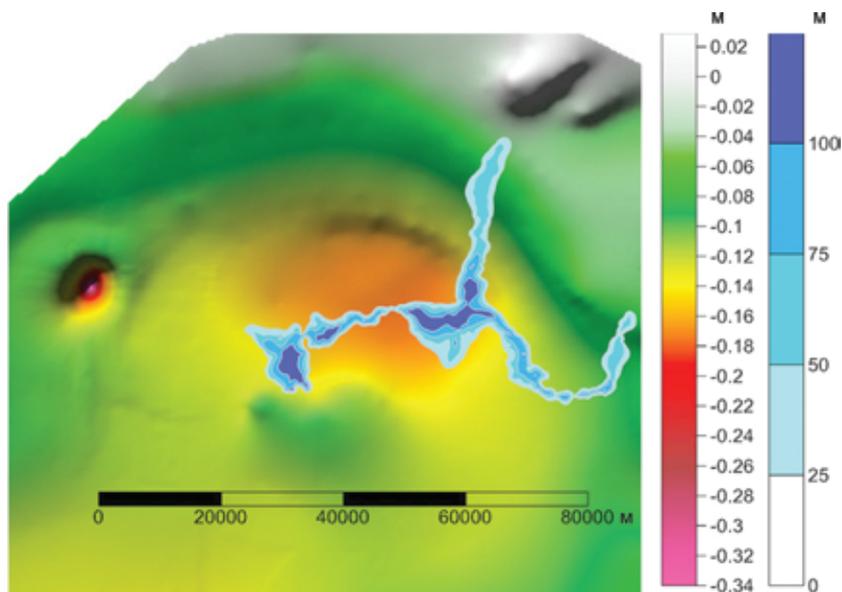


Рис. 3. Заполнение озера Мид (синие контуры) и изостатическая реакция (красно-зеленая цвето-теневая заливка), по данным повторных нивелировок [33]. Изолированная аномалия в западной части — депрессионная воронка, связанная с отбором грунтовых вод Лас-Вегасом

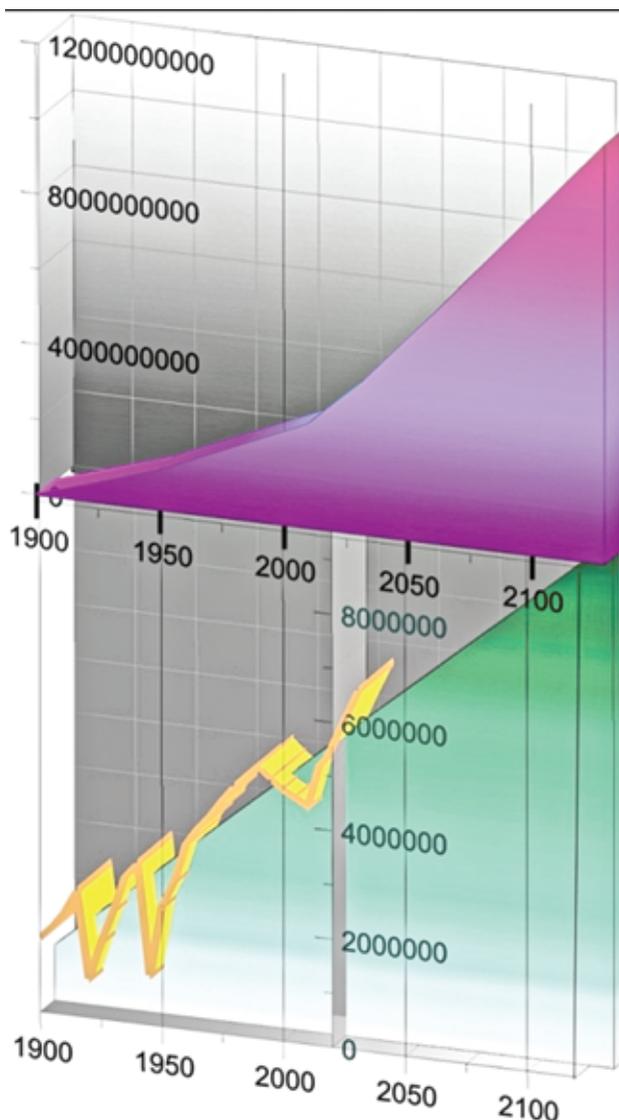


Рис. 4. Внизу – график изменения численности населения (вертикальная ось Y) во времени по годам (ось X) показан желтым цветом, зеленым – линейный прогностический тренд до 2120 г. Вверху – график прогнозного роста ежегодного накопления твердых бытовых отходов в тоннах (вертикальная ось Y) во времени по годам (ось X)

нами использован метод пенепплена, позволяющий по его изгибной деформации за счет вышележащей толщи получать довольно точные количественные определения. При этом принципиальны зоны с более молодым возрастом выраженных денудационных процессов для учета вероятного в ряде случаев увеличения (в зависимости от термальной истории) T_e в геологическом времени.

Вязкость и мощность астеносферы в свою очередь крайне важны при расчетах скорости изостатической реакции [20]. Хотя ее участие применительно к древним щитам, таким как Балтийский, признается далеко не всеми, многие геодинамические проблемы не находят иного объяснения [41].

В качестве рабочей реологической основы, показавшей удовлетворительные результаты при моделировании Финско-Ладожского сегмента

Балтийского щита, нами принимается величина вязкости мантии порядка 10^{21} Па/с, а также наличие специфической астеносферы (либо слоев и линз со специфическими свойствами) с вязкостью в диапазоне $2,0 \cdot 10^{18} - 7,0 \cdot 10^{19}$ Па/с при $T_e \sim 5 \cdot 10^{23}$ Нм.

Для проведения приблизительных расчетов влияния жизнедеятельности человека были подготовлены grids, оценивающие техногенную нагрузку и ее изменения в будущем столетии. Они суммируют осредненные значения мощности накопленных техногенных отложений, нагрузки от зданий, сооружений и релевантных элементов городской и социальной инфраструктур.

Матрицы, аппроксимирующие прогнозные сценарии, рассматривают варианты разрастания моноцентрической Санкт-Петербургской агломерации при условии быстрого роста численности населения. Согласно анализу Федеральной службы государственной статистики (Росстата), к 2031 г. население Петербурга увеличится до 6 млн 352 тыс. человек относительно текущей цифры 5 млн 361 тыс. официально зарегистрированных и проживающих к началу 2019 г. Линейный тренд (рис. 4) прогнозирует их рост приблизительно до 10 млн к 2020 г. Это позволяет нам оценить возможные масштабы строительства и объемы твердых бытовых отходов (ТБО) Петербурга и агломерации с применением простых известных формул расчета, исходя из среднего объемного и весового уровня образования мусора на человека и предприятие [6].

Удельные нормы образования ТБО в странах мира различаются с максимальными показателями в США, где фиксируется более 812 кг/год на душу населения [12], причем каждые 10 лет эта цифра увеличивается на 10 % [6]. Временной рост учитывался нами, как и обратный фактор потенциального снижения массы ТБО за счет увеличения сжигаемого материала. Расчеты демонстрируют, что только лишь растущие годовые объемы ТБО (в тысячах тонн) сравнительно небольшой СПГА превышают годовые выносы взвешенных веществ с суши во многие крупные шельфовые бассейны при несопоставимых площадях. Таким образом, не будет преувеличением считать многие агломерации крупнейшими депоцентрами мира на единицу площади, хотя весьма специфическими! Уже этот фактор позволяет говорить о необходимости количественных оценок изостатических отклонений.

Существующий слой техногенных отложений перекрывает болотные, морские либо озерно-ледниковые отложения с изменчивой мощностью, составляющей первые метры на значительных площадях. Принятая нами в расчетах плотность при пересчете в эквивалент водной нагрузки – $1,7$ г/см³.

Другая значимая составляющая представлена осредненной по районам нагрузкой от зданий и сооружений (в том числе полезной). Алгоритм ее аппроксимации включал обобщение параметров типовых строительных проектов (<http://>

data.gov.spb.ru/opendata/7840013199-passports_houses/) с их приблизительным распределением на площади, строительные калькуляторы (<https://prostobuild.ru/onlainraschet/204-raschet-nagruzki-na-fundament.html>), использование известных данных по этажности застройки (сводная карта высотности Яндекса https://yandex.ru/company/researches/2014/buildings_height_map/), а также компьютерный анализ ее плотности по доступным снимкам картографических интернет-сервисов. В зависимости от типовых и индивидуальных проектов нагрузка от зданий и сооружений, включая полезную, обычно изменяется в диапазоне до 40 т/м², за исключением таких отдельных объектов, как Лахта-центр. Как известно, высотная застройка распространена по периферии в связи с ограничениями в исторической части Петербурга. В настоящее время площадь агломерации с близкой к сплошной застройке достигает 600 км². Кроме того, условно выделяются два пояса агломерации – внутренний и внешний. Площадь территории второго (внешнего) пояса даже в настоящее время превышает 6000 км², что существенно для изостатических движений. В прогнозных расчетах был принят сценарий роста численности населения всей агломерации до 10 млн человек к 2120 г.

Результаты и обсуждение. Для упрощения демонстрации коро-мантийных ответов на антропогенную нагрузку мы представим примеры моделей как быстрой упругой реакции, так и продолжительной собственно изостатической, связанной с вязким течением глубинного материала. При этом рассмотрим результаты осуществления застройки тех или иных крупных районов для упрощения оценки амплитуд движений, хотя для более точной детерминации их скоростей желательна детализация с вовлечением частых временных срезов.

Упругая реакция. По результатам моделирования, первые этапы застройки Петербурга, включая послевоенное восстановление до 1950-х годов [13], могли привести лишь к малоамплитудным движениям. При этом максимальное расчетное погружение вряд ли превышало 3,5 см (рис. 5), более вероятные результирующие значения – 2–3 см. Незначительная нагрузка на такой сравнительно небольшой площади должна практически полностью компенсироваться литосферой.

В 1960-е годы интенсивно развивается жилищное строительство в новых районах города. Только за 1966–1983 гг. было построено 40 млн м² жилой площади. В настоящее время Петербург активно расширяется с застройкой периферических районов и элементов агломерации при значительной роли высокоэтажного, а также уплотнительного строительства. Преимущественно упругая расчетная реализованная реакция должна была составить до 5,5 см (рис. 5).

Одно из направлений развития СПГА – создание намывных территорий – искусственных

земельных участков Невской губы Финского залива между островами Котлин и Васильевским с различными версиями стратегического проекта Петербурга «Морской фасад». Известны идеи кольцевого намыва с получением и последующей застройкой намывных островов. Хотя такие проекты пока не получили одобрения на реализацию, их осуществление в последующем столетии вероятно. В качестве примера изостатических реакций рассмотрим абстрактный схематичный план интенсивного преобразования человеком восточной части Невской губы с высокоэтажной застройкой. Впрочем, более значимой будет составляющая перераспределения осадочного материала в процессе строительства, а существующее повышение уровня океана приведет к пересмотру абсолютных отметок антропогенно создаваемых участков в сторону увеличения. Суммарное максимальное погружение во время реализации подобных проектов оценивается нами в 7–11 см (рис. 6). При этом возможны различные реакции в пределах береговых застроенных районов, зависящие в том числе от местонахождения песка, с помощью которого предполагается намыв.

Собственно изостатическая реакция. Возрастающая площадь техногенной нагрузки могла привести к вовлечению в изостатические процессы более глубоких горизонтов, однако определение амплитуды и продолжительности ответа будут существенно отличаться в зависимости от особенностей реологических моделей. Напомним, что величина T_e оценивается в моделях последнециклового адаптации принципиально различно, обычно в диапазоне от 30–40 [17; 24; 26] до 70–100 км и более [37; 42]. Отметим также, что T_e и мощность литосферы не тождественные понятия. В практическом отношении важно, что амплитуда релевантного ответа (в противоположность площади проявления реакции) будет существенно уменьшаться при увеличении T_e . При существующей техногенной нагрузке она будет меняться от 20–40 см (рис. 7) до незначительной величины, поэтому необходимы дополнительные критерии ее корректного определения.

Вполне логичны представления о вероятных латеральных изменениях T_e в зависимости от возраста коры и последующих процессов тектономагматической активизации. По специализированному анализу аномалий Буге предполагается направленное увеличение T_e от 5–15 км вдоль атлантической окраины Балтийского щита до 50 и более в западной [38]. Однако в западной равнинной части, где T_e прогнозируется выше 25 км, у метода существуют серьезные ограничения, так что ожидать сколько-нибудь надежных значений здесь не приходится [34]. По характеру выклинивания плитного чехла юго-восточного склона Балтийского щита в районе Петербургской агломерации и реакции на плейстоценовое эрозионно-аккумулятивное перераспределение материала T_e было определено нами в интервале 35–50 км с направленным ростом от 7 км во

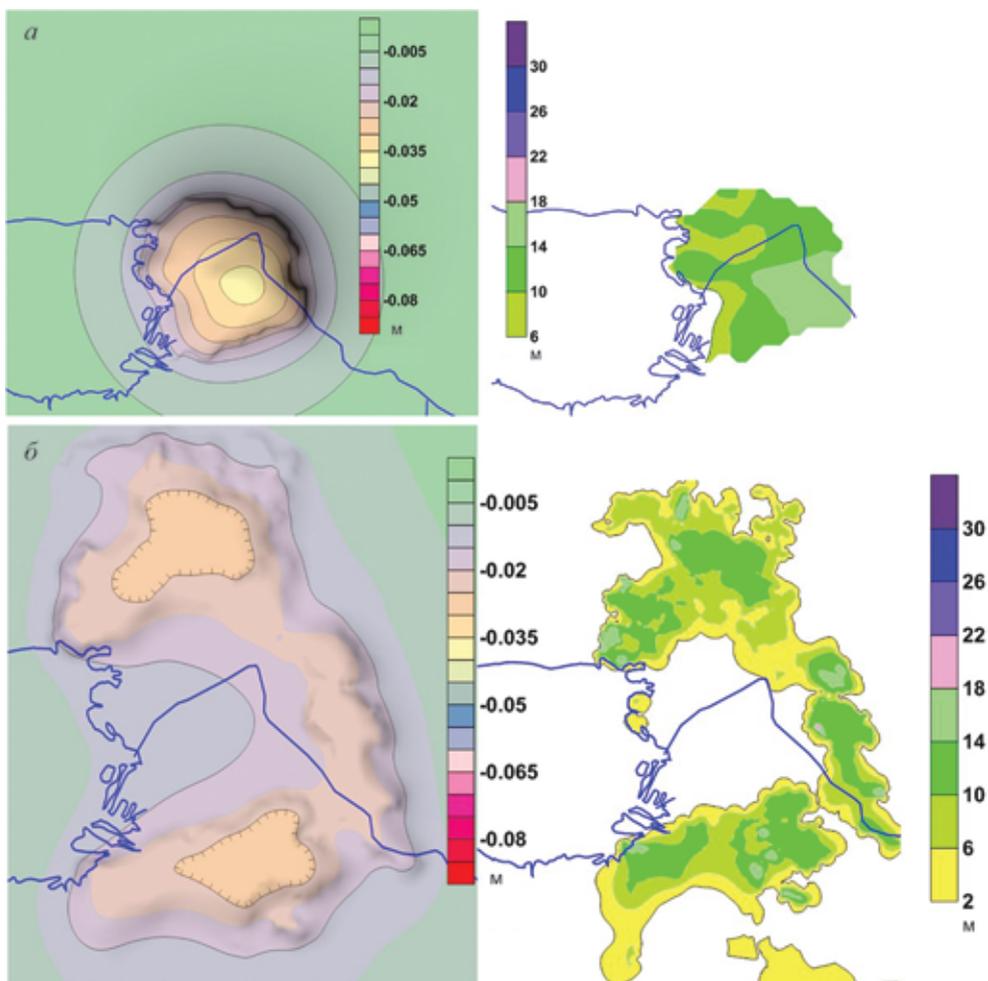


Рис. 5. Возможная реализованная упругая реакция на антропогенные изменения в центральной (а) и периферической (б) частях Санкт-Петербурга. Справа показаны соответствующие эквиваленты максимальной водной нагрузки

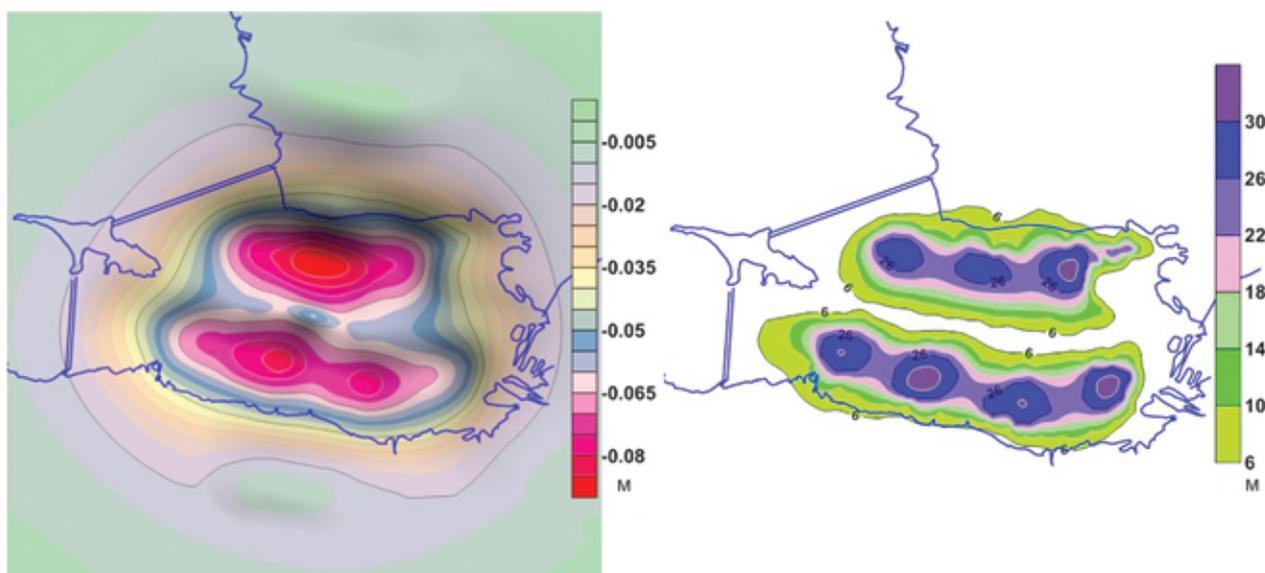


Рис. 6. Возможная упругая реакция на масштабное создание и застройку искусственных земельных участков восточной части Невской губы. Справа – эквивалент водной нагрузки

Рис. 7. Возможная общая изостатическая реакция на антропогенные изменения Санкт-Петербургской агломерации без учета ее будущего развития

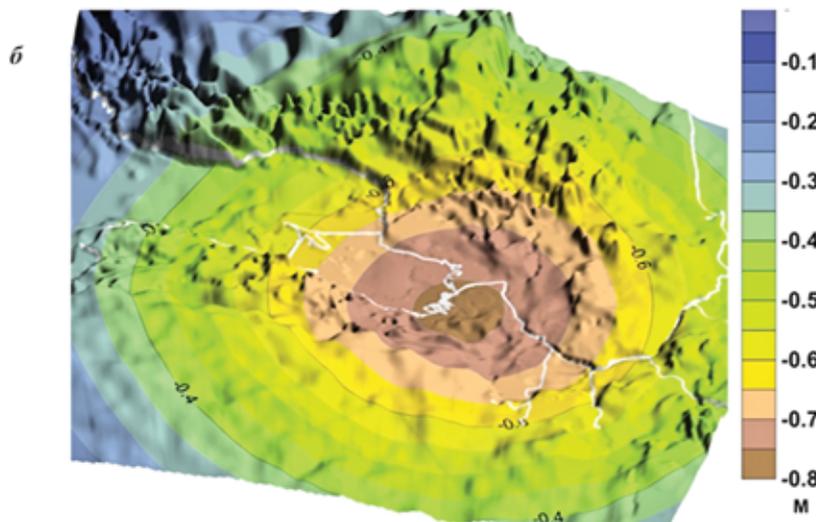
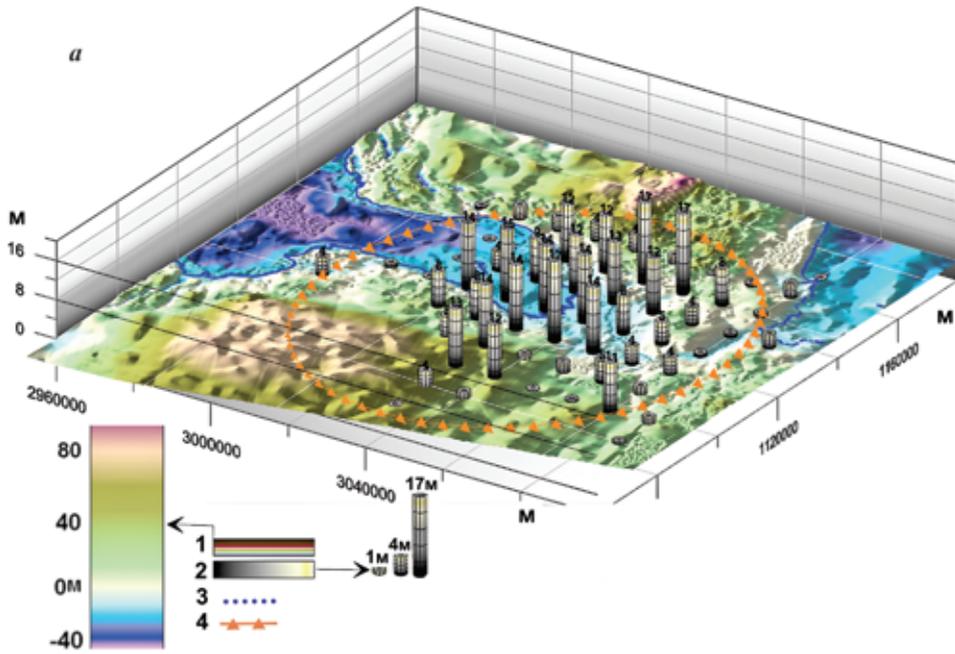
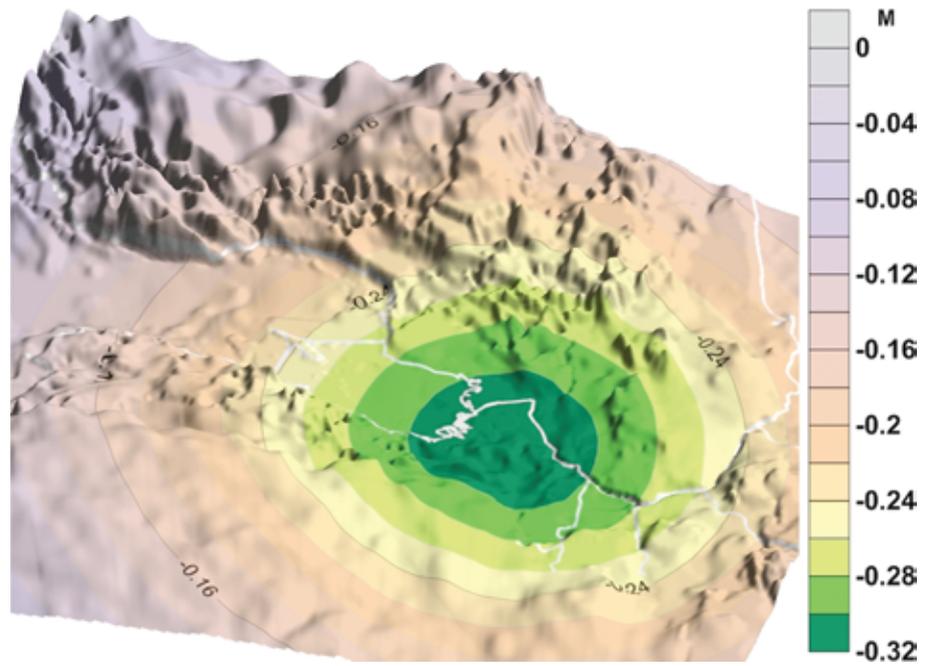


Рис. 8. Возможное распределение техногенной нагрузки через 100 лет (а) и суммарная максимальная собственно изостатическая реакция на антропогенные изменения Санкт-Петербургской агломерации по данному сценарию (б)
 1 – оценочный рельеф; 2 – нагрузка в метрах водного эквивалента; 3 – современная береговая линия; 4 – зона диаметром 100 км

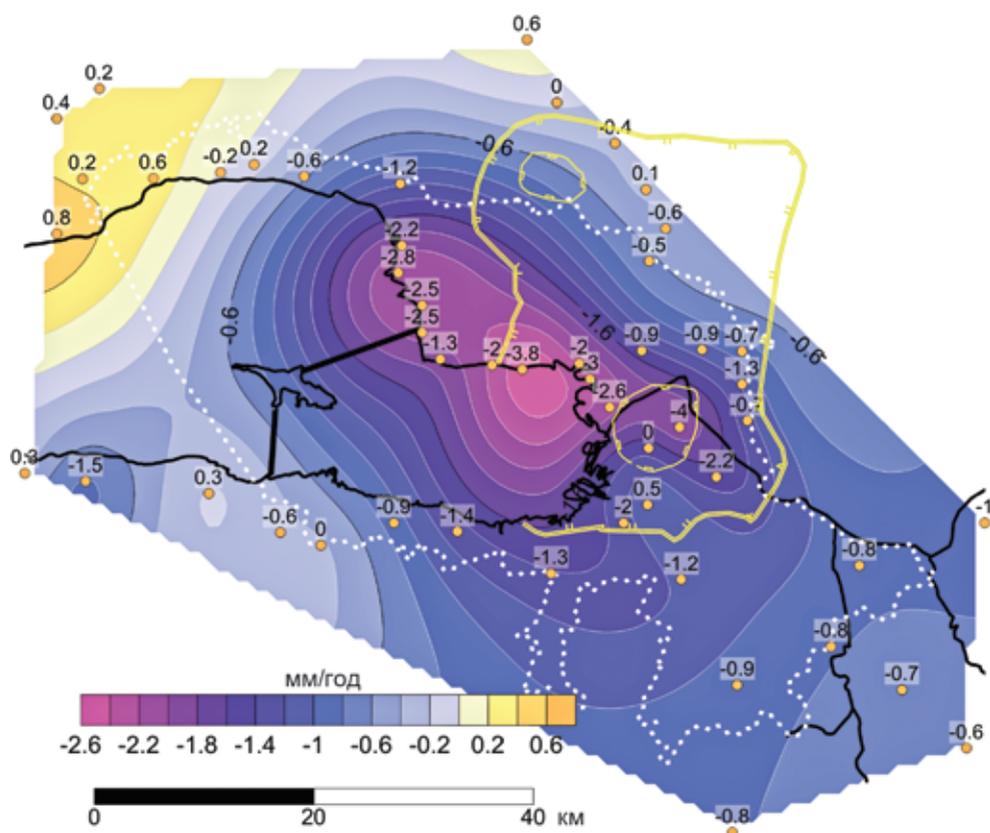


Рис. 9. Аппроксимация современных движений, по данным повторных нивелировок на 2005 г. (оранжевые точки) [16] без аномальных значений. Светлые линии с бергштрихами показывают центральную часть депрессионной воронки [7] до начала восстановления пьезометрических уровней в 1980-е годы. Белая линия точечного пунктира – граница Санкт-Петербурга

время раннерифейских магматических проявлений в районе Ладожского озера [18]. При этих параметрах ожидаемые максимальные амплитуды преимущественно будущего прогибания от уже существующей нагрузки – до 25–30 см (безотносительно конкретного длительного временного интервала), однако различные направления будущего развития СПГА могут существенно изменить ситуацию.

Общая же расчетная максимальная амплитуда изостатических движений может вследствие расширения СПГА достичь одного метра (рис. 8) при продолжительном, выходящем далеко за рамки 2120 г. процессе вязкого перераспределения материала, зависящем от реологии глубоких горизонтов литосферы и характера астеносферы. На быстроту реакции влияет распределение глубинной вязкости при максимальной скорости в случае наличия высокорасположенных линз с параметрами $2-4 \cdot 10^{18}$ Па/с, что возможно, исходя из анализа местной гидроизостатической реакции Ладожского озера [4].

Представления о современных вертикальных движениях региона отличаются в зависимости от используемых методов наблюдений [5; 8] и масштабов моделирования (степени осреднения), однако сохраняется общий глобальный тренд, обычно связываемый с последней дегляциацией. С ним интерферируют местные отклонения,

вызванные, например, гидроизостазией [4]. Хотя многие результаты измерений скоростей современных движений могут отражать лишь короткопериодные реакции, некоторые данные [8; 16] демонстрируют отличия от прогнозируемых моделями значений (от +0,8 до +2,2 мм/год) [5; 17; 32]. Опубликованные результаты повторных нивелировок в пределах СПГА [16] имеют принципиальное значение, раскрывая сложный рисунок местных отклонений вертикальных движений от тренда. На рис. 9 приведена обработка этих данных методом Криге после исключения локальных аномальных значений (более –8 мм) с последующим сглаживанием фильтром Гаусса.

В целом результат соотносится с прогнозным на время наблюдений несколько смещенным центром общих опусканий в зоны намыва районов Лахты и Васильевского острова. Теоретически в настоящее время относительный центр изостатической воронки (ИВ) может быть смещен к юго-востоку относительно рис. 9.

Погружение крупных агломераций обычно небезосновательно связывают с масштабной эксплуатацией подземных водоносных горизонтов и комплексов с формированием депрессионной воронки (ДВ). Действительно, такой процесс часто главенствует в погружении топографической поверхности за счет изменений, происходящих прежде всего в водоупорах [44]. Однако

он существенно зависит от положения и типов водоносных комплексов, а также степени уплотнения осадочных пород. Основы расчетов были заложены около столетия назад Карлом Терцаги и используются при сопоставлении с наблюдениями [43]. Эксплуатация вендского водоносного комплекса, безусловно, участвует в процессе погружения поверхности, но ограничивающим фактором представляется величина эрозионного среза, поскольку, по нашим оценкам, вендские отложения в геологической истории претерпели уплотнение денудированной толщей мощностью не менее 1500 м. Локальное воздействие может быть и в том числе связано с изменениями порового давления в четвертичных осадках. Принципиально, что максимальное снижение напоров в вендском водоносном комплексе (около 70 м) с центром ДВ в пределах городской черты наблюдалось в 1970-х годах в связи с интенсивным отбором воды для технических нужд, но с 80-х годов произошло практически полное восстановление напоров. В настоящее время центр ДВ сместился существенно северо-западнее Санкт-Петербурга [7]. Однако даже абрис максимального развития ДВ (см. рис. 9) не соотносится с трендом погружения региона, а ее роль в случае СПГА представляется несколько завышенной, несмотря на участие в процессе, особенно применительно к некоторым локальным аномалиям. Заметим также, что ДВ и ИВ должны иметь реверсивную интерференцию. Развитие ДВ может приводить к погружению поверхности, но с релевантным поднятием поверхности фундамента, и наоборот при перераспределении водных масс и минерализации в осадочных породах. Миграция вод по зонам повышенной трещиноватости в пределах василостровской свиты и погребенных плейстоценовых врезов, впрочем, также оказывает ограниченное расчетное влияние на ИВ, учитываемое нами.

В последующее столетие изостатические движения за счет одного лишь антропогенного фактора могут ухудшить прогноз затопления побережья за счет дополнительного погружения, составляющего до 10–25 % от прогнозируемого поднятия уровня океана. Однако это лишь часть проблемы влияния изостазии. Дело в том, что гидроизостазия при дополнительном ожидаемом расчетном повышении уровня крайней южной части Ладоги и общем повышении уровня грунтовых вод будет интерферировать с техногенной составляющей, замедляя незначительное периферийное гляциоизостатическое поднятие либо даже создавая в будущем область единого обширного малоамплитудного погружения, дополнительно ухудшающего прогноз.

Заключение. Современный геодинамический режим служит одним из главенствующих факторов изменения рельефа земной поверхности. Обоснованный расчет направленности и скоростей современных и будущих движений земной коры с учетом всех глобальных и региональных

факторов на основе современного компьютерного моделирования и представлений о реологии Земли необходим для анализа и оценки рисков воздействия опасных морских явлений, а также прогнозирования развития береговых зон в будущем.

Наши предварительные результаты демонстрируют, что оценка антропогенной составляющей вертикальных движений актуальна применительно к наиболее крупным быстро растущим агломерациям, находящимся в береговых зонах на низких абсолютных отметках в условиях повышающегося уровня океана, где даже небольшая амплитуда дополнительного погружения обязана учитываться при прогнозах. Быстрая упругая реакция среды и дальнейшее собственно изостатическое прогибание, вызванное масштабными техногенными изменениями, могут ускорить будущее затопление низменных прибрежных территорий и, таким образом, представляют дополнительную геологическую опасность.

Авторы признательны гл. науч. сотруднику исследовательской компании «Тектонор» (Норвегия) профессору В. Фьелдскому за обсуждение расчетов упругой составляющей вертикальных движений и изостазии региона, а также чл.-корр. РАН А. И. Жамойде и ст. науч. сотруднику Института озероведения РАН канд. геол.-минерал. наук Т. В. Сапелко за внимательное и критическое прочтение рукописи. Частично исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-77-20041.

1. Амантов А. В. Компьютерный атлас «Геология и полезные ископаемые восточной части Финского залива» / А. В. Амантов, В. А. Жамойда, С. Ф. Мануйлов, П. Е. Москаленко, М. А. Спиридонов // Региональная геология и металлогения. – 2002. – № 15. – С. 120–132.
2. Амантов А. В. Геология дочетвертичных образований и тектоника Ладожского озера // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 58. – С. 22–32.
3. Амантов А. В. Проблемы голоценового развития Южного Приладожья / А. В. Амантов, М. Г. Амантова, Д. В. Рябчук, А. Ю. Сергеев, Т. М. Гусенцова, В. А. Жамойда, В. Фьелдскар // Региональная геология и металлогения. – 2016. – № 65. – С. 37–49. – Режим доступа: http://www.vsegei.ru/ru/public/reggeology_met/content/2016/65/65_03.pdf (дата обращения: 06.02.2009).
4. Амантов А. В., Амантова М. Г. Моделирование послеледникового развития района Ладожского озера и восточной части Финского залива // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 69. – С. 5–12. – Режим доступа: http://www.vsegei.ru/ru/public/reggeology_met/content/2017/69/69_02.pdf (дата обращения: 06.02.2009).
5. Васенин В. А. Оценка современных вертикальных движений земной поверхности для целей определения устойчивости исходных пунктов нивелирной сети г. Санкт-Петербурга и определения длительных осадок зданий и сооружений // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2012. – № 14. – С. 37–56.
6. Венцолис Л. С., Скорник Ю. И., Флоринская Т. М. Система обращения с отходами: принципы организации и оценочные критерии. – СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2007. – 207 с.
7. Воронюк Г. Ю. Водообмен в краевых частях Балтийского шита и прилегающих артезианских бассейнов

по изотопным и химическим данным (научные и прикладные аспекты). Карельский перешеек / Г. Ю. Воронюк, Г. С. Бородулина, И. А. Крайнюкова, И. В. Токарев // Труды Карельского научного центра РАН. – 2016. – № 9. – С. 46–56.

8. Галаганов О. Парадокс отличий в вертикальных движениях по данным определений разными методами / О. Галаганов, В. Горшков, Т. Гусева, Ю. Кузнецов, Н. Розенберг, В. Передерин, Н. Щербакова // Геодезия, картография и аэрофотознимания. – 2009. – Вып. 71. – С. 241–248.

9. Дедеев В. А., Куликов П. К. Происхождение структур земной коры. – Л.: Наука, 1988. – 264 с.

10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости / Теоретическая физика. В 10 т. – М.: Наука, 1987. – Т. 7. – 248 с.

11. Ляв А. (A. E. H. Love) Математическая теория упругости / Перевод 4-го английского издания: В. В. Булгакова, В. Я. Натанзона. – М.; Л.: 1935. – 674 с.

12. Масленников А. Ю. Характеристика твердых бытовых отходов // Твердые бытовые отходы: Спец. информ. бюл. – 2005. – № 1. – С. 1–3. – Режим доступа: <http://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=33> (дата обращения: 11.11.2019).

13. Семенцов С. В. Градостроительство Санкт-Петербурга в XVIII – начале XXI века. – СПб.: СПбГАСУ, 2011. – 525 с.

14. Тетельмин В. В., Даниелов Э. Р. Прогиб земной коры от веса крупных водохранилищ // Вестник РАЕН. – 2014. – № 4. – С. 15–20.

15. Шаров Н. В. Глубинные сейсмические исследования в юго-восточной части Фенноскандинавского щита // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37, № 5. – С. 104–120.

16. Ядута В. А. Новейшая тектоника Санкт-Петербурга и Ленинградской области // Минерал. – 2006. – №1. – С. 28–35.

17. Amantov A., Fjeldskaar W. Geological-Geomorphological features of the Baltic Region and Adjacent Areas: imprint on glacial-postglacial development // Regional geology and metallogeny. – 2013. – No. 53. – Pp. 90–104. – URL: http://www.vsegei.ru/ru/public/reggeology_met/content/2013/53/53_10.pdf (06.02.2020).

18. Amantov A., Amantova M., Fjeldskaar W. Late-Post-Glacial Tilt of the Lake Ladoga – Gulf of Finland Region and Rheology Models // Geophysical Research Abstracts. – doi: 10.13140/RG.2.2.20123.77608

19. Brothie J. F., Silvester R. On crustal flexure // Journal of Geophysical Research. – 1969. – Vol. 74. – Pp. 5240–5252.

20. Cathles L. M. The Viscosity of the Earth's Mantle. – Princeton: Princeton Univ. Press, 1975. – 386 p.

21. Cathles L. M. Interpretation of postglacial isostatic adjustment phenomena in terms of mantle rheology // Earth Rheology, Isostasy and Eustasy / N.-A. Mörner (ed.). – London: John Wiley and Sons, 1980. – Pp. 11–45.

22. Farrell W. E. Deformation of the Earth by surface loads // Reviews of Geophysics and Space Physics. – 1972. – Vol. 10, No. 3. – Pp. 761–797.

23. Fjeldskaar W. Elastic and isostatic subsidence of the Blåsjø artificial lake, Southern Norway // Terra Nova. – 1990. – Vol. 2, Iss. 4. – Pp. 377–381.

24. Fjeldskaar W., Cathles L. The present rate of uplift of Fennoscandia implies a low-viscosity asthenosphere // Terra Nova. – 1991. – Vol. 3. – Pp. 393–400.

25. Fjeldskaar W. Viscosity and thickness of the asthenosphere detected from the Fennoscandian uplift // Earth and Planetary Science Letters. – 1994. – Vol. 126. – Pp. 399–410.

26. Fjeldskaar W. The flexural rigidity of Fennoscandia inferred from the post-glacial uplift // Tectonics. – 1997. – Vol. 16. – Pp. 596–608.

27. Fjeldskaar W., Amantov A. Tilted Norwegian post-glacial shorelines require a low viscosity asthenosphere and a weak lithosphere // Regional geology and metallogeny. – 2017. – No. 70. – Pp. 48–59.

28. Freedon W., Michel V. Multiscale Potential Theory (With Applications to Geoscience). – Boston: Birkhäuser, 2004. – 509 p.

29. Ji S., Sun S., Wang Q., Marcotte D. Lamé parameters of common rocks in the Earth's crust and upper mantle // Journal of Geophysical Research. – 2010. – Vol. 115, B06314. – doi: 10.1029/2009JB007134

30. Kachuck S. B., Cathles L. M. Benchmarked computation of time-domain viscoelastic Love numbers for adiabatic mantles // Geophysical Journal International. – 2019. – Vol. 218, Iss. 3. – Pp. 2136–2149. – <https://doi.org/10.1093/gji/ggz276>

31. Kaufmann G., Amelung F. Reservoir-induced deformation and continental rheology in vicinity of Lake Mead, Nevada // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105, B7. – Pp. 16341–16358.

32. Kierulf H. P. A GPS velocity field for Fennoscandia and a consistent comparison to glacial isostatic adjustment models / Ed. by H. P. Kierulf, H. Steffen, M. J. R. Simpson, M. Lidberg, P. Wu, H. Wang // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2014. – Vol. 119, No. 8. – Pp. 6613–6629. – doi: 10.1002/2013JB010889

33. Longwell C. R. Geologic setting of Lake Mead // Comprehensive Survey of Sedimentation in Lake Mead, 1948–49 / Ed. by O. Smith, C. P. Vetter, C. B. Cummings. – Washington, 1960. – Pp. 11–20.

34. McKenzie D. A note on estimating T_e from Bouguer coherence // GEM – International Journal on Geomathematics. – 2016. – Vol. 7 (1). – Pp. 103–116. – URL: <https://link.springer.com/journal/13137/7/1> (06.02.2020).

35. Melini D., Gegout P., Spada G. et al. REAR – a regional ELastic Rebound calculator. 2014. User manual for version 1.0 – URL: <http://hpc.rm.ingv.it/rear/REAR-v1.0-User-Guide.pdf> (19.10.2019).

36. Nerem R. S. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era / Ed. by R. S. Nerem, B. D. Beckley, J. T. Fasullo, B. D. Hamlington, D. Masters, G. T. Mitchum // PNAS. – 2018. – Vol. 115, No. 9. – Pp. 2022–2025. – doi: 10.1073/pnas.1717312115

37. Peltier W. R., Argus D. F., Drummond R. Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2015. – No. 120. – Pp. 450–487. – doi: 10.1002/2014JB011176

38. Pérez-Gussinyé M., Watts A. B. The long-term strength of Europe and its implications for plate-forming processes // Nature. – 2005. – Vol. 436. – Pp. 381–384. – doi: 10.1038/nature03854

39. Poutanen M. Global periodic effects in GPS time series / Ed. by M. Poutanen, M. Ollikainen, H. Koivula, M. Bilker, J. Jokela, H. Virtanen // Proceedings of the workshop: the state of GPS vertical positioning precision: Separation of Earth processes by space geodesy (April 2–4, 2003, Luxembourg). – Luxembourg, 2004. – Vol. 23. – Pp. 137–142.

40. Puura V. Latest events affecting the Precambrian basement, Gulf of Finland and surrounding areas / Ed. by V. Puura, A. Amantov, S. Tikhomirov, I. Laitakari // Geological Survey of Finland. – 1996. – Special Paper 21. – Pp. 115–125.

41. Richards M. A., Lenardic A. The Cathles parameter (C): A geodynamic definition of the asthenosphere and implications for the nature of plate tectonics // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2018. – Vol. 19. – Pp. 4858–4875. – <https://doi.org/10.1029/2018GC007664>

42. Steffen H., Wu P. Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia – a review of data and modelling // Journal of Geodynamics. – 2011. – Vol. 52, No. 3–4. – Pp. 169–204.

43. Santos S. M., Cabral J. J. S. P., Filho I. D. S. P. Monitoring of soil subsidence in urban and coastal areas due to groundwater overexploitation using GPS // Natural Hazards. – 2012. – Vol. 64. – Pp. 421–439. – <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0247-9>

44. Zhang Y. Q. Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in the plain of Beijing city, China / Ed. by Y. Q. Zhang, H. L. Gong, Z. Q. Gu, R. Wang,

- X. J. Li, W. J. Zhao // Hydrogeology Journal. – 2014. – Vol. 22. – Pp. 397–409. – doi: 10.1007/s10040-013-1069-x
1. Amantov A. V., Zhamoida V. A., Manuilov S. F. et al. Computer atlas “Geology and minerals of the eastern part of the Gulf of Finland”. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2002. No. 15, pp. 120–132. (In Russian).
 2. Amantov A. V. Pre-Quaternary geology and tectonics of Lake Ladoga. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2014. No. 58, pp. 22–32. (In Russian).
 3. Amantov A. V., Amantova M. G., Ryabchuk D. V. et al. On the question of Holocene development of south Lake Ladoga region. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2016. No. 65, pp. 37–49. URL: http://www.vsegei.ru/ru/public/reggeology_met/content/2016/65/65_03.pdf (06.02.2009). (In Russian).
 4. Amantov A. V., Amantova M. G. Modeling of post-glacial development of Lake Ladoga and the Eastern part of the Gulf of Finland. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2017. No. 69, pp. 5–12. URL: http://www.vsegei.ru/ru/public/reggeology_met/content/2017/69/69_02.pdf (06.02.2020). (In Russian).
 5. Vasenin V. A. Estimation of modern vertical movements of the earth's surface for the purpose of determining the stability of the initial points of the leveling network of St. Petersburg and the definition of long-term precipitation of buildings and structures. *Urban Development and Geotechnical Construction*. 2012. No. 14, pp. 37–56. (In Russian).
 6. Ventsulis L. S., Skornik Y. I., Florinskaya T. M. Sistema obrashcheniya s otkhodami: printsipy organizatsii i otenochnye kriterii [Waste management system: principles of organization and evaluation criteria]. St. Petersburg: PIYaF RAN. 2007. 207 p.
 7. Voronyuk G. Yu., Borodulina G. S., Kraynyukova I. A. et al. Water exchange in the marginal parts of the Baltic Shield and adjacent artesian basins according to isotopic and chemical data (scientific and applied aspects. Karelian Isthmus). *Proceedings of the Karelian scientific center of the Russian Academy of Sciences*. Petrozavodsk. 2016. No. 9, pp. 46–56. (In Russian).
 8. Galaganov O., Gorshkov V., Guseva T. et al. Paradox of differences in vertical movements according to definitions by different methods. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. 2009. Iss. 71, pp. 241–248. (In Russian).
 9. Dedeev V. A., Kulikov P. K. Proiskhozhdenie struktur zemnoy kory [Origin of Earth crust structures]. Leningrad: Nauka. 1988. 264 p.
 10. Landau L. D., Lifshits E. M. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]. Teoreticheskaya fizika v 10 t. Moscow: Nauka. 1987. Vol. 7. 258 p.
 11. Love A. E. H. Matematicheskaya teoriya uprugosti [Mathematical theory of elasticity]. Perevod 4-go angliyskogo izdaniya: V. V. Bulgakova, V. Ya. Natanzona. Moscow; Leningrad. 1935. 674 p.
 12. Maslennikov A. Y. Characteristics of municipal solid waste. *Solid household waste: Special Newsletter*. 2005. No. 1, pp. 1–3 (In Russian). URL: <http://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=33> (11.11.2019).
 13. Sementsov S. V. Gradostroitel'stvo Sankt-Peterburga v XVIII – nachale XXI veka [Urban planning of St. Petersburg in the XVIII – early XXI century]. St. Petersburg. 2011. 511 p.
 14. Tetelmin V. V., Danielov E. R. Deflection of the Earth's crust from the weight of large reservoirs. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2014. No. 4, pp. 15–20. (In Russian).
 15. Sharov N. V. Deep seismic studies in the South-Eastern part of the Fennoscandian Shield. *Geophysical journal*. 2015. Vol. 37. No. 5, pp. 104–120. (In Russian).
 16. Yaduta V. A. Newest tectonics of St. Petersburg and Leningrad region. *Mineral*. 2006. No. 1, pp. 28–36. (In Russian).
 17. Amantov, A., Fjeldskaar, W. 2013: Geological-Geomorphological features of the Baltic Region and Adjacent Areas: imprint on glacial-postglacial development. *Regional geology and metallogeny*. 53. 90–104. URL: http://www.vsegei.ru/ru/public/reggeology_met/content/2013/53/53_10.pdf (06.02.2020).
 18. Amantov, A., Amantova, M., Fjeldskaar, W. 2017: Late-Post-Glacial Tilt of the Lake Ladoga – Gulf of Finland Region and Rheology Models. *Geophysical Research Abstracts*. doi: 10.13140/RG.2.2.20123.77608
 19. Brotchie, J. F., Silvester, R. 1969: On crustal flexure. *J. Geophys. Res.* 74. 5240–5252.
 20. Cathles, L. M. 1975: The Viscosity of the Earth's Mantle. Princeton Univ. Press. 386.
 21. Cathles, L. M. 1980: Interpretation of postglacial isostatic adjustment phenomena in terms of mantle rheology. In Mörner, N. A. (ed.): *Earth Rheology, Isostasy and Eustasy*. 11–45.
 22. Farrell, W. E. 1972: Deformation of the Earth by surface loads. *Rev. Geophys. Space Phys.* 10. 3. 761–797.
 23. Fjeldskaar, W. 1990: Elastic and isostatic subsidence of the Blåsjø artificial lake, Southern Norway. *Terra Nova*. 2. 4. 377–381.
 24. Fjeldskaar, W., Cathles, L. 1991: The present rate of uplift of Fennoscandia implies a low-viscosity asthenosphere. *Terra Nova*. 3. 393–400.
 25. Fjeldskaar, W. 1994: Viscosity and thickness of the asthenosphere detected from the Fennoscandian uplift. *Earth and Planetary Science Letters*. 126. 399–410.
 26. Fjeldskaar, W. 1997: The flexural rigidity of Fennoscandia inferred from the post-glacial uplift. *Tectonics*. 16. 596–608.
 27. Fjeldskaar, W. and Amantov, A. 2017: Tilted Norwegian post-glacial shorelines require a low viscosity asthenosphere and a weak lithosphere. *Regional geology and metallogeny*. 70. 48–59.
 28. Freedon, W., Michel, V. 2004: Multiscale Potential Theory (With Applications to Geoscience). Birkhäuser, Basel, Berlin, Boston. 509.
 29. Ji, S., Sun, S., Wang, Q., Marcotte, D. 2010: Lamé parameters of common rocks in the Earth's crust and upper mantle. *Journal of Geophysical Research*. 115. B06314. doi:10.1029/2009JB007134
 30. Kachuck, S. B., Cathles, L. M. 2019: Benchmarked computation of time-domain viscoelastic Love numbers for adiabatic mantles. *Geophysical Journal International*. 218. 3. 2136–2149. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz276>
 31. Kaufmann, G., Amelung, F. 2000: Reservoir-induced deformation and continental rheology in vicinity of Lake Mead, Nevada. *Journal of Geophysical Research*. 105. B7. 16341–16358.
 32. Kierulf, H. P., Steffen, H., Simpson, M. J. R. et al. 2014: A GPS velocity field for Fennoscandia and a consistent comparison to glacial isostatic adjustment models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 119. 8. 6613–6629. doi: 10.1002/2013JB010889
 33. Longwell, C. R. 1960: Geologic setting of Lake Mead. In Smith, O., Vetter, C. P., Cummings, C. B. (eds.): *Comprehensive Survey of Sedimentation in Lake Mead, 1948–49*. Washington. 11–20.
 34. McKenzie, D. 2016: A note on estimating T_e from Bouguer coherence. *GEM – International Journal on Geomatics*. 7. 1. 103–116.
 35. Melini, D., Gegout, P., Spada, G., King, M. 2014. REAR – a regional ElAstic Rebound calculator. 2014. User manual for version 1.0. URL: <http://hpc.rm.ingv.it/rear/REAR-v1.0-User-Guide.pdf> (19.10.2019).
 36. Nerem, R. S., Beckley, B. D., Fasullo, J. T., Hamlington, B. D., Masters, D., Mitchum, G. T. 2018: Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. PNAS. doi: 10.1073/pnas.1717312115
 37. Peltier, W. R., Argus, D. F., Drummond, R. 2015: Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 120. 450–487.
 38. Pérez-Gussinyé, M., Watts, A. B. 2005: The long-term strength of Europe and its implications for plate-forming processes. *Nature*. 436. doi:10.1038/nature03854

39. Poutanen, M., Ollikainen, M., Koivula, H., Bilker, M., Jokela, J., Virtanen, H. 2004: Global periodic effects in GPS time series. *Proceedings of the workshop: the state of GPS vertical positioning precision: Separation of Earth processes by space geodesy (April 2–4, 2003, Luxembourg)*. Luxembourg. 137–142.
40. Puura, V., Amantov, A., Tikhomirov, S., Laitakari, I. 1996: Latest events affecting the Precambrian basement, Gulf of Finland and surrounding areas. *Geological Survey of Finland. Spec. Paper* 21. 115–125.
41. Richards, M. A., & Lenardic, A. 2018: The Cathles parameter (Ct): A geodynamic definition of the asthenosphere and implications for the nature of plate tectonics. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 19. 4858–4875. <https://doi.org/10.1029/2018GC007664>
42. Steffen, H., Wu, P. 2011: Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia – a review of data and modelling. *Journal of Geodynamics*. 52. 3–4. 169–204.
43. Santos, S. M., Cabral, J. J. S. P., Filho, I. D. S. P. 2012: Monitoring of soil subsidence in urban and coastal areas due to groundwater overexploitation using GPS. *Nat Hazards*. 64. 421–439. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0247-9>
44. Zhang, Y., Gong, H., Gu, Z., Wang, R., Li, X., Zhao, W. 2014: Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in the plain of Beijing city, China. *Hydrogeology Journal*. 22. 397–409. doi: 10.1007/s10040-013-1069-x

Амантов Алексей Владиславович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <Amantov.A@yandex.com>
Кэслс Лоренс М. – заслуженный профессор, Корнеллский университет. Терстон-авеню, 616, Итака, Нью Йорк, 14853, США.

Амантова Марина Геннадьевна – инженер, ВСЕГЕИ¹.

Amantov Aleksei Vladislavovich – Leading Researcher, VSEGEI¹. <Amantov.A@yandex.com>
Lawrence M. Cathles – Professor Emeritus, Cornell University. 616 Thurston Ave, Ithaca, New York, 14853, USA.
Amantova Marina Gennadevna – Engineer, VSEGEI¹.

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия.
A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia.