

УДК 551.334.2:627.15(282.247.41)«625»

DOI 10.37724/RSU.2020.68.3.013

А. О. Уткина

### **Влияние гляциоизостатических деформаций на речной сток в бассейне верхней Волги в последнюю ледниковую эпоху<sup>1</sup>\***

Одним из дискуссионных вопросов палеогеографии бассейна верхней Волги в последнюю ледниковую эпоху (МИС 2) является возможное существование обширных приледниковых озер. Помимо ледникового подпруживания, существование которого подвергается в последнее время сомнению, возможным механизмом возникновения таких озер могли служить гляциоизостатические движения в приледниковой области. В данном исследовании проведена реконструкция изменений топографии бассейна верхней Волги на основе моделей гляциоизостатических деформаций ICE-5G и ICE-6G L. Peltier. Анализ реконструированных продольных профилей рек показал, что их деформации были недостаточны для прекращения течения и формирования обширных подпружных озер. Возможность существования локальных озер выявлена в истоках и в нижнем течении верхней Волги, где проходила ось компенсационного приледникового вала, вызывавшая уменьшение продольного уклона. Возможно также, что уменьшение уклона вызвало направленную аккумуляцию в реке, которая сменилась врезанием с началом дегляциации и погружением приледникового вала. Используемая методика применима для оценки влияния гляциоизостазии на развитие рельефа других приледниковых регионов, а также для потенциальных пользователей моделей гляциоизостатической компенсации.

*валдайское оледенение; верхняя Волга; гляциоизостазия; моделирование гляциоизостатической компенсации; приледниковый вал; приледниковые озера*

#### **Введение**

Верхневолжье — регион, занимающий часть Валдайской возвышенности и Русской равнины в пределах бассейна верхней Волги. Волга в литературе традиционно подразделяется на три части: верхнюю, среднюю и нижнюю. Верхней Волгой называют часть течения от истока до устья реки Унжи. Несмотря на довольно продолжительную историю исследования, в палеогеографии данного региона до сих пор существует большое количество нерешенных и дискуссионных вопросов. К их числу относится вопрос о времени образования речной сети верхней Волги.

Согласно мнению большинства исследователей, ключевую роль в формировании современного геоморфологического облика региона сыграли материковые оледенения. При этом считается, что определяющее воздействие на рельеф Верхневолжья было оказано последним материковым оледенением, валдайским, когда большая часть бассейна верхней Волги находилась в перигляциальной зоне. Одним из ключевых событий, которое могло оказать существенное влияние на формирование рельефа перигляциальной зоны, считается формирование обширных подпружных приледниковых озер. Концепцией, возникшей в 70-е годы XX века [Квасов, 1975] и с

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта РНФ 17-17-01289.

\* Уткина А. О. Влияние гляциоизостатических деформаций на речной сток в бассейне верхней Волги в последнюю ледниковую эпоху // Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. 2020. № 3 (68). С. 116–129. <https://doi.org/10.37724/RSU.2020.68.3.013>

© Уткина А. О., 2020

тех пор часто встречающейся в литературе, постулируется, что на месте современного бассейна верхней Волги в позднем плейстоцене, начиная с максимума последнего валдайского оледенения (с 21 тыс. лет назад), существовала система подпружных приледниковых озер. По мере отступления ледника она постепенно понижала свой уровень и около 14,5 тыс. лет назад произошел ее спуск с образованием долины прорыва у города Плёса. Считается, что в результате этого спуска и произошло формирование речной сети верхней Волги в современном виде.

Формирование приледниковых озер хотя и считается одним из ключевых палеогеографических событий Верхневолжья, но до сих пор не является достаточно изученным. Так, точно не установлен механизм формирования приледниковых озер. Согласно первоначальной концепции [Квасов, 1975], наступающий ледник перегородил реки, протекавшие на месте современного бассейна верхней Волги в северном направлении, в результате чего они оказались подпружены. Однако данный механизм не находит подтверждения в свете последних исследований, показавших, что прорыв Волги у города Плёса произошел еще в ходе дегляциации конца среднего плейстоцена и, следовательно, в последнюю ледниковую эпоху Волга подпруживаться ледником уже не могла [Panin, Astakhov, Komatsu, Lotsari, Lang, Winsemann, 2020].

Другой возможный механизм подпруживания — гляциоизостатические деформации в приледниковой области. Эффект гляциоизостаии состоит в прогибании литосферы под тяжестью покровного ледника и в компенсационных поднятиях литосферы на некотором отдалении от ледника [Peltier, 1974; Farrell, Clark, 1976; Lambeck, Chappell, 2001; Peltier, 2004; Peltier, Argus, Drummond, 2015]. Отметим, что автор исходной концепции приледниковых озер [Квасов, 1975] не мог учесть гляциоизостатический фактор, поскольку в то время он еще недооценивался научным сообществом и возможность его количественной оценки появилась значительно позднее, только с развитием компьютерных технологий.

Цель данного исследования — установить степень и характер влияния гляциоизостатических деформаций на бассейн верхней Волги в позднем плейстоцене. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: определение подходящей методики моделирования гляциоизостатических деформаций, непосредственное проведение моделирования на определенное количество временных срезов, построение карт, иллюстрирующих деформации, построение продольного профиля реки Волги на исследуемом участке с учетом деформаций, определение возможности влияния деформаций на формирование системы приледниковых озер.

### **Гляциоизостазия: основные теоретические концепции**

Прежде всего необходимо четко охарактеризовать центральное понятие в данной работе — гляциоизостаию. Рост ледниковых щитов вызывал прогибание литосферы глубиной в несколько сот метров, которое при таянии ледников сменялось близкими по величине поднятиями, охватывавшими эпохи позднеледниковой и частично межледниковой. Такие движения литосферы носят название гляциоизостатических, а все явления и процессы, связанные с этими движениями и обусловленные стремлением литосферы к достижению гидростатического равновесия при изменении ледниковой нагрузки, входят в понятие «гляциоизостазия» [Былинский, 1996].

Одним из важнейших факторов гляциоизостатического воздействия на развитие рельефа являлось формирование крупных валообразных поднятий (приледниковых компенсационных валов — *glacial forebulge*) литосферы вокруг ледниковых щитов. Прогибание литосферы под нагрузкой ледниковых щитов распространялось за пределы их краев, образуя флексуру, наклоненную к ледниковому щиту. В дистальном направлении от ледника в пределах перигляциальной зоны она завершалась валообразным поднятием. Обнаружение признаков таких поднятий затруднено опусканиями, следовавшими за гляциоизостатическими поднятиями и составлявшими до 90–95 % амплитуды бывших поднятий [Былинский, 1990]. Несмотря на это, исследователями, в том числе Е. Н. Былинским, найдены свидетельства существования компенсационных поднятий в валдайское время. Уже в текущем столетии выполнены реконструкции развития ряда западноевропейских рек, показывающие их реакцию на формирование и последующее исчезновение приледникового вала [Wallinga, Törnqvist, Busschers, 2004; Busschers, Kasse, van Balen, 2007; Panin, Adamiec, Filippov, 2015].

Проведенное Е. Н. Былинским исследование позволило наметить расположение этих поднятий. Осевая зона основного валообразного поднятия, согласно Былинскому, существовала в период 18–12,5 тыс. лет назад и протягивалась от срединной части Северного моря через север Нидерландов, центральную часть Германии, юг Польши и далее по серии возвышенностей в центре европейской части России к долине реки Обь. Ось поднятия пересекала и долину реки

Волги, причем как раз в районе города Плёса, располагаясь в 100–200 км от границы максимального распространения ледника. Амплитуды поднятия достигали от нескольких до 200 м, ширина — нескольких сот километров. Согласно реконструкции [Cohen, Gibbard, Weerts, 2014] приледниковый компенсационный вал в Западной Европе простирался от края Скандинавского ледникового щита до предгорий Альп, достигая ширины в 1000 км.

Большая ширина приледникового компенсационного вала вызывала в реках, их пересекавших, подпор выше осевой зоны поднятия, что приводило к накоплению в долинах рек аллювия и озерно-болотных отложений повышенной мощности. Согласно Е. Н. Былинскому, даже крупные реки не могли «перепиливать» это поднятие, так как вследствие его большой ширины происходило уменьшение средних уклонов и скорости течения реки на значительном расстоянии выше оси поднятия.

По мнению геофизиков, валообразное поднятие должно было возникать преимущественно в результате скопления вещества астеносферы, отличавшегося относительно большой вязкостью при его перемещении из области распространения ледника вследствие прогибания литосферы и перетока вещества астеносферы в стороны от ледника. Некоторое воздействие на формирование валообразных поднятий оказывали также упругие напряжения, возникавшие в литосфере под действием ледниковой нагрузки. По мере таяния ледника и постепенного снятия нагрузки валообразное поднятие перемещалось вслед за отступающим краем ледника к центру ледникового щита в результате перемещения вещества астеносферы в обратном направлении [Peltier, 2004].

Помимо деформаций литосферы, под влиянием ледниковых щитов в плейстоцене происходило изменение гравитационного поля вследствие накопления ледниковой массы и понижения уровня океана [Peltier, Argus, Drummond, 2015]. Привязанная к уровню океана поверхность геоида во время оледенений изменялась в разной степени: в северных широтах, вблизи ледниковых щитов, она снижалась на 90–100 м, тогда как в тропических областях — на 120–130 м [Там же]. Следствием этого стало создание дополнительного по направлению от ледника уклона земной поверхности, абсолютные высоты которой отсчитываются от геоида.

Возможное создание локального уклона земной поверхности в направлении от приледниковых компенсационных валов к леднику могло стать причиной формирования подпрудных озер на территории Верхневолжья. Это становится возможным в том случае, если влияние гляциоизостазии было достаточно сильным и существенно изменило распределение абсолютных высот на значительном расстоянии от ледника. Истоки Волги, частично перекрытые краем ледникового щита, располагались в зоне глубокого приледникового понижения, которое, однако, занимало достаточно узкую область у самого края ледника. Образование же обширных подпрудных озер было возможно лишь под влиянием приледникового вала, располагавшегося в сотнях километров от ледника. Если бы участок верхней Волги на оси вала оказался на более высоком гипсометрическом уровне, чем верховья, это вызвало бы подпруживание как основной реки, так и притоков, что повлекло бы формирование озерных водоемов.

### **Подпрудные приледниковые озера Верхневолжья**

Сама гипотеза существования приледниковых озер развилась во второй половине прошлого века. Согласно принятой большинством исследователей концепции, в период максимальной стадии развития ледникового покрова в перигляциальной зоне северной части центра Русской равнины в результате подпруживания ледником рек, имевших прежде направление стока к северу (прежде всего верховья Волги), возникла региональная система подпрудных приледниковых озер [Квасов, 1975; Гросвальд, Котляков, 1989; Гросвальд, 1999]. Данные озера являлись звеном Великой приледниковой системы стока Северной Евразии [Гросвальд, Котляков, 1989; Гросвальд, 1999]. Один берег этих озер образовывал край ледника. Порог стока системы озер проходил по Бежецкому верху, Смоленско-Московской и Галичско-Чухломской возвышенностям и Северным увалам [Квасов, 1975].

Основной труд, где рассматриваются приледниковые озера на Русской равнине и связанные с их существованием перестройки рек, создан Д. Д. Квасовым [1975]. В результате анализа обширных геолого-геоморфологических материалов им было проведено детальное изучение рельефа, что позволило воссоздать палеогеографическую обстановку приледниковой зоны и выявить роль подпрудных приледниковых озер на протяжении завершающих этапов позднего неоплейстоцена. Д. Д. Квасовым была составлена схема эволюции приледниковых озер Верхневолжья и определены их уровни, которые изменялись с течением времени. Так, он определил уровень 145 м — во время максимальной стадии валдайского оледенения (21 тыс. лет назад), 130 м — во время отступления ледников вепсовской стадии (17,5 тыс. лет назад), 120 м —

во время начального этапа отступления ледников лужской стадии (15 тыс. лет назад). В данном исследовании мы попытаемся проверить достоверность концепции при помощи средств компьютерной обработки, используя для сравнения обозначенные даты.

### **Методика моделирования гляциоизостатических деформаций**

Связанные с гляциоизостазией изменения земной поверхности и поля силы тяжести влекли за собой во время оледенений неравномерные деформации, что могло изменить направления стока рек в перигляциальной зоне Русской равнины по сравнению с современным. Соответственно, приняв во внимание величины и характер региональных гляциоизостатических деформаций, можно получить основу для моделирования гидрографических объектов LGM и последующих стадий деградации ледника.

В настоящей работе используются две версии модели гляциоизостатических деформаций ICE: ICE-5G (VM2 L90) версия 1.2 и ICE-6G\_C (VM5a) [Peltier, 2004; Peltier; Argus, Peltier, Drummond, 2014; Peltier, Argus, Drummond, 2015]. Математическая основа теории гляциоизостатических деформаций была изначально создана в 1970-х годах [Peltier, 1974] и ее применение в основном было направлено на изучение изменений уровня Мирового океана. Дальнейшие разработки привели к появлению возможности создания глобальной модели гляциоизостатических деформаций, которая и в настоящее время постоянно дорабатывается. В моделях содержатся сведения о континентальной палеотопографии и палеобатиметрии океана, начиная от последнего ледникового максимума до настоящего времени, а также сведения о распространении ледниковых щитов, их толщине, об уровне Мирового океана (данные находятся в свободном доступе на персональном сайте автора W. R. Peltier и распространяются в формате NetCDF).

Модель ICE-5G использует в качестве основы современную топографию, полученную по данным ETOPO2 [Eakins, Sharman, 2012]. Файлы NetCDF доступны для скачивания на сайте автора в архивах .tar, .gzip или .zip. Каждый файл содержит данные об абсолютной высоте (Surface Altitude), толщине ледниковых щитов (Thickness of the Ice Sheet) и сведения об их распространении (Ice-mask). Значения даны в точках в узловых линиях сетки координат разрешением 1x1 градус, покрывающей весь земной шар.

Данные модели ICE-6G распространяются на том же сайте начиная от 21 тыс. лет назад (последний ледниковый максимум) до настоящего времени с интервалом 500 лет. Каждый файл формата NetCDF также содержит информацию для точек на сетке разрешением 1x1 градус для всего земного шара. Сведения, содержащиеся в модели, это: топография (переменная Topo), изменение топографии по сравнению с современной (переменная Topo\_Diff), абсолютная высота (переменная olog), поверхность, свободная от оледенения (переменная sftlf), и поверхность, занятая ледниками (переменная stgif). Топография включает батиметрию, и для шельфовых ледников переменная olog выдает поверхность льда, тогда как переменная Topo выдает глубину моря.

Данные, полученные при использовании моделей, позволяют визуализировать изменения в топографии континентов во время последнего ледникового максимума и последующих стадий дегляциации. Для иллюстрации этих изменений была использована информация моделей о разнице между современной топографией и топографией разных временных срезов конца плейстоцена. В изначальной комплектации модели ICE-6G имеется переменная, уже содержащая эту разницу, тогда как в модели ICE-5G такой переменной нет, и эта разница была вычислена вручную. Эта операция, как и все, которые будут далее описаны, проводилась в ГИС-программе ArcMap. ArcMap — одно из основных ГИС-приложений, поставляемых в наборе ArcGIS Desktop. Оно используется для решения различных ГИС-задач, в том числе для работы с картами, для создания и редактирования наборов данных с помощью средств геообработки.

Моделирование производилось для трех временных срезов — таких же, для которых Д. Д. Квасовым были реконструированы уровни системы приледниковых озер верхней Волги: 21 тыс., 17,5 тыс. и 15 тыс. лет назад. Однако по ICE-5G не было выпущено реконструкции для 17,5 тыс. лет назад, поэтому использовалась реконструкция для 17 тыс. лет назад. Для вычисления разницы с современной топографией в модели ICE-5G были использованы файлы, содержащие информацию о топографии выбранных временных срезов, и файл с информацией о современной топографии. Данные файлы были подгружены в программу ArcMap с помощью инструмента «Создать растровый слой NetCDF» из комплекта инструментов «Многомерные данные», специально предназначенных для работы с данным форматом файлов. Далее из получившихся растров с палеотопографией выбранных временных срезов вычитался растр с современной топографией с помощью инструмента «Калькулятор растра» из группы инструментов «Алгебра карт». Эта

операция позволила получить по одному растру на каждый исследуемый временной срез, в которых содержатся сведения о разнице между современной топографией и палеотопографией. Аналогичные растры, уже содержащиеся в модели ICE-6G, были автоматически загружены в ArcMap при помощи инструмента «Создать растровый слой NetCDF».

Пример отображения подобных «первичных» растров для одной из дат, 21 тыс. лет назад (LGM), представлен на рисунке 1. Как можно видеть по шкале внизу рисунка, изменения топографии 21 тыс. лет назад в целом для всего отображенного региона являются положительными, соответственно абсолютные отметки местности в целом были выше, чем современные.

Таким образом, создается впечатление, что эффект, произведенный гляциоизостатическими движениями в регионе верхней Волги (согласно используемой модели), должен был проявиться в общем поднятии территории по сравнению с современным ее состоянием. Такой эффект наблюдается благодаря тому, что в исследуемый период уровень моря был ниже современного. Поскольку абсолютные высоты отсчитываются от уровня моря, мы и получаем общее поднятие абсолютных отметок территории, которые к настоящему времени «поднялись» вместе с уровнем моря. Однако нас интересуют изменения абсолютных отметок, произошедшие именно вследствие гляциоизостатического эффекта, то есть необходимо в полученных растрах разницы современных и палеовысот нивелировать влияние изменения уровня моря на изменение абсолютной высоты.

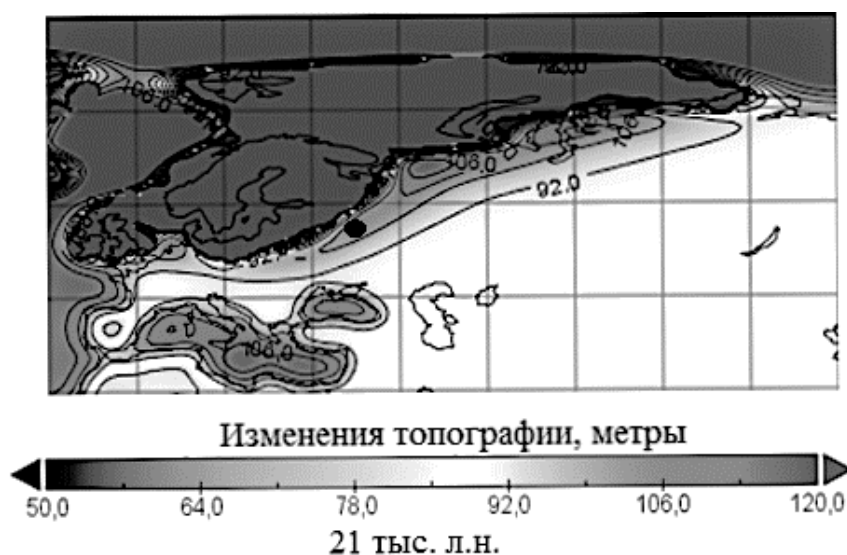


Рис. 1. Изменения топографии 21 тыс. лет назад по сравнению с современной (по ICE-6G). Район исследования отмечен черной точкой

Чтобы выделить только деформации земной коры и не учитывать изменения уровня моря, от растров с информацией об изменении абсолютных высот для интересующих нас временных срезов мы отняли константу, отражающую изменения высоты геоида. Строго данную величину получить нельзя, но примерно можно определить по исходным файлам модели (как фоновая величина поправок вблизи приледниковых компенсационных валов). Хотя менялась высота геоида неодинаково, в пределах исследуемого региона разница составляет первые метры, при этом точность данного исследования позволяет пренебречь такими величинами. На рисунке 1 видно, что за пределами флексуры, где не было влияния гляциоизостазии, действительно видно обширное пространство, занятое контуром с одним значением — 92 м. Эта цифра и была принята нами для даты 21 тыс. лет назад (модель ICE-6G) как высота, на которую уровень моря в LGM отличался от современного и которую нам нужно было исключить. Свои изменения уровня моря были определены и для других дат, и для модели ICE-5G. Для ICE-5G константа LGM составила 110 м, для 17,5 тыс. лет назад — 108 м, а для 15 тыс. лет назад — 100 м. Для ICE-6G константа LGM составила 92 м, для 17,5 тыс. лет назад — 78 м, а для 15 тыс. лет назад — 82 м. Эта операция была проведена при помощи инструмента «Калькулятор растра» из группы инструментов «Алгебра карт» и позволила получить растры изменения топографии с поправками на уровень моря для каждой даты и каждой модели.

Далее с помощью инструмента «Калькулятор растра» из группы инструментов «Алгебра карт» к растру с современной топографией были прибавлены растры с поправками, что позволило получить цифровую модель палеорельефа (палео-ЦМР) на интересующие нас даты (21, 17,5 и 15 тыс. лет назад). В качестве растра с современной топографией были использованы свободно распространяемые данные радарной топографической съемки SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) на территорию бассейна Верхней Волги. В связи с достаточно редкой сеткой исходных данных поправок (1x1 градус) была использована ЦМР с разрешением 250 м. Для получения наглядной иллюстрации изменений топографии в бассейне Волги под влиянием эффекта гляциоизостазии были построены продольные профили по руслу Волги для каждой из палео-ЦМР и для современной ЦМР. Построение профилей проводилось автоматически с помощью инструмента построения профилей на панели инструментов ArcGIS 3D Analyst в программе ArcMap. Дальнейшая графическая обработка профилей осуществлялась в программе CorelDraw.

### Результаты исследования

Рассмотрим моделируемые изменения топографии в более крупном масштабе по сравнению с рисунком 1 непосредственно на территории бассейна верхней Волги по обоим используемым моделям. На рисунке 2 представлены карты бассейна верхней Волги с поправками, реконструированными по модели ICE-5G, а на рисунке 3 — по модели ICE-6G.

Максимальные повышения абсолютных отметок в пределах Верхневолжья для дат 21 и 15 тыс. лет назад находятся в диапазоне 10–15 м, для 17,5 тыс. лет назад по ICE-6G они также не превышают 15 м, а по ICE-5G — доходят до 20 м. Наблюдаемые повышения абсолютных отметок сосредоточены в пределах приледникового вала, который хорошо выделяется на изучаемой территории. На полученных изображениях по обоим моделям видно, что осевая зона поднятия пересекает отрезок долины между Рыбинском и Плёмом.

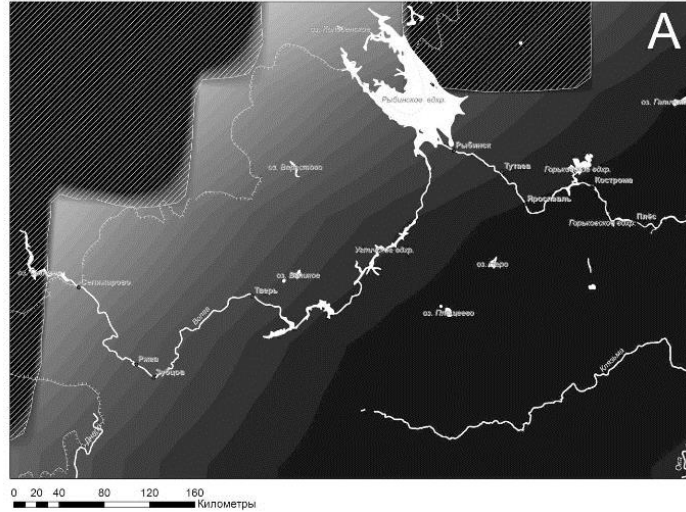
Как видно из рисунка 2, ширина и высота вала, длина и высота проксимального (в сторону ледника) склона со временем изменяются. Хотя между моделями не наблюдается значительной разницы максимальных отметок вала и его простираения (вал вытянут с северо-востока на юго-запад), длина и высота проксимального склона значительно варьируют.

Опускание соответствует приледниковому понижению, в пределах которого располагаются истоки Волги. ICE-5G показывает стабильно длинный склон для каждого из реконструируемых временных срезов. Для даты 21 тыс. лет назад наибольшее опускание у границы ледника составляет –89 м, для 17 тыс. лет назад сильно увеличивается до –157 м и для 15 тыс. лет назад уменьшается до –104 м. В пределах современного течения Волги максимальные опускания составляют –52 м, –59 м и –30 м соответственно.

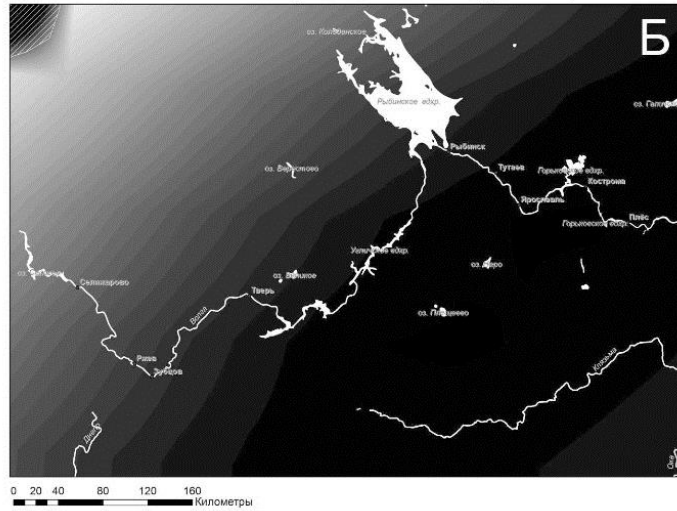
По ICE-6G для дат 21 тыс. лет назад и 17,5 тыс. лет назад уклон к леднику наблюдается очень небольшой, максимальные понижения составляют –24 м и –9 м соответственно. Реконструкция на 15 тыс. лет назад показывает картину, более похожую на реконструкцию по ICE-5G, где максимальное понижение составляет –99 м. В пределах современного течения Волги максимальные опускания составляют –14 м, –7 м и –50 м соответственно.

Скорее всего, такая реконструкция связана с положением границы ледника, заложенной в модели. На картах по обоим моделям на дату 21 тыс. лет назад (последний ледниковый максимум) показано положение максимальной границы валдайского оледенения по последним данным научно-исследовательского Всероссийского геологического института (ВСЕГЕИ) [Astakhov, Shkatova, Zastrozhnov, Chuyko, 2016], используемой нами в качестве иллюстрации принятой научным сообществом границы. По ICE-5G видно, что в районе озера Селигер две границы практически совпадают, однако севернее Селижарово они сильно отступают друг от друга. По ICE-6G граница по модели оказывается южнее границы ВСЕГЕИ. 17 тыс. лет назад по ICE-5G видно закономерное отступление границы ледника к северо-западу, что совпадает с представлениями о том, что в данное время развивалась дегляциация. Но по ICE-6G мы видим противоречивую этим представлениям картину: граница ледника 17,5 тыс. лет назад реконструируется значительно южнее, чем 21 тыс. лет назад, по той же модели. Ледник перекрывает долину Волги в районе Твери, что противоречит всем когда-либо производившимся реконструкциям и последним обобщениям [Astakhov, Shkatova, Zastrozhnov, Chuyko, 2016; Hughes, Gyllencreutz, Lohne, Mangerud, Svendsen, 2016]. Кроме того, максимальное положение ледника наблюдалось значительно раньше (21 тыс. лет назад), он еще и не заходил так далеко на юг. Подобное положение границы ледника и обусловило реконструкцию такого небольшого понижения по ICE-6G для данного временного среза.

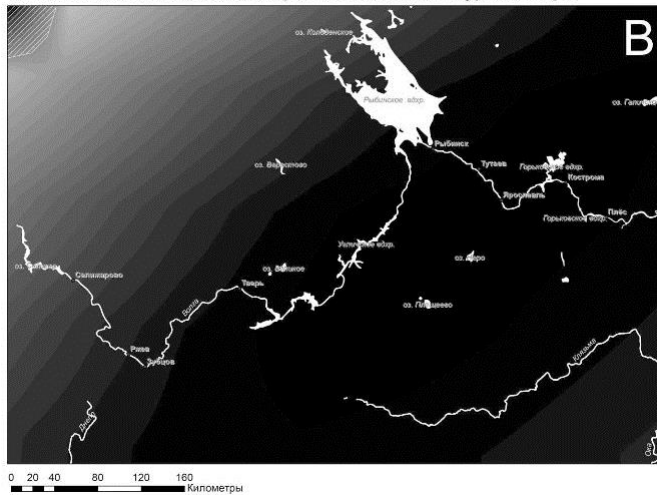
21 тыс. л.н. Данные ICE-5G с поправкой на изменение уровня моря



17 тыс. л.н. Данные ICE-5G с поправкой на изменение уровня моря



15 тыс. л.н. Данные ICE-5G с поправкой на изменение уровня моря



Изменения абс. высоты

м, абс.

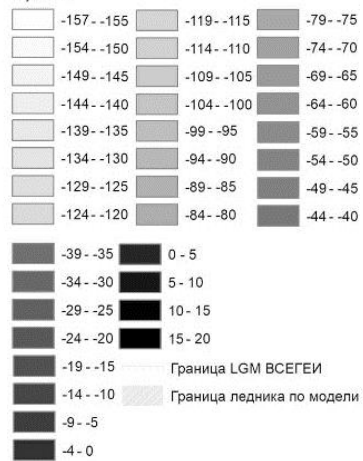
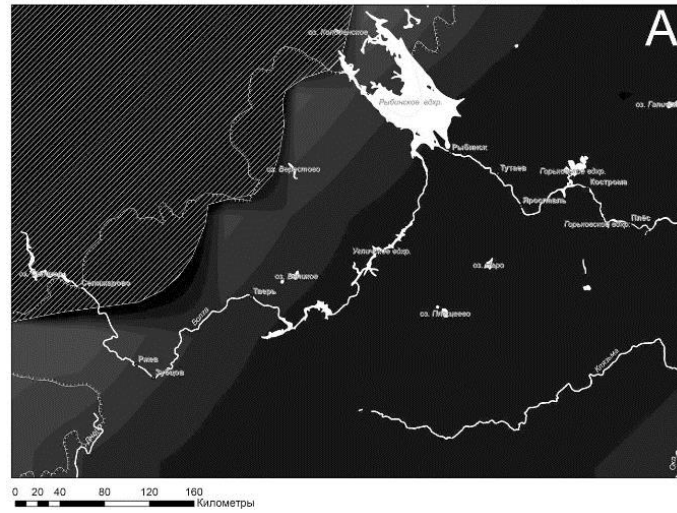
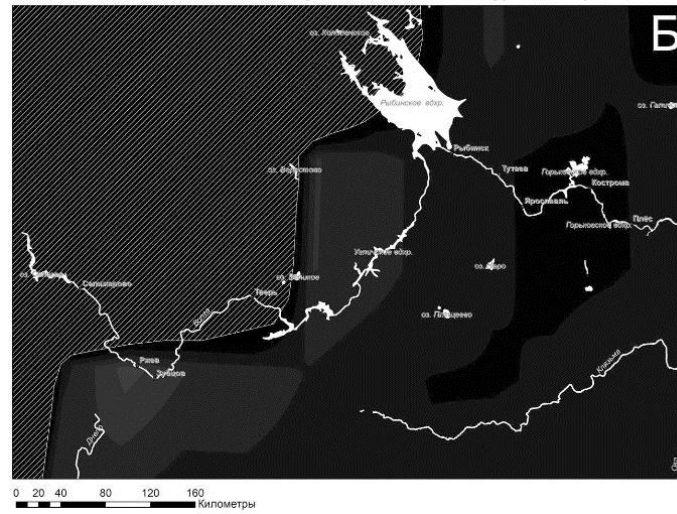


Рис. 2. Изменения топографии по данным ICE-5G с поправкой на уровень моря  
 А — 21 тыс. лет назад, Б — 17 тыс. лет назад, В — 15 тыс. лет назад, Г — условные обозначения

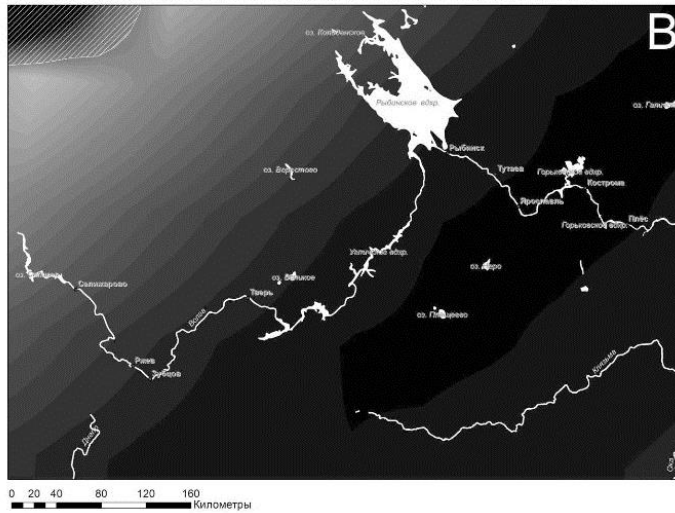
21 тыс. л.н. Данные ICE-6G с поправкой на изменение уровня моря



17,5 тыс. л.н. Данные ICE-6G с поправкой на изменение уровня моря



15 тыс. л.н. Данные ICE-6G с поправкой на изменение уровня моря



Изменения абс. высоты

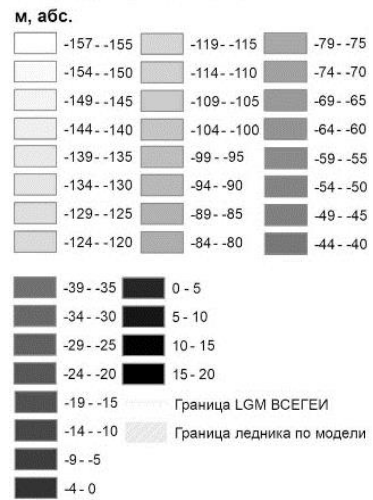
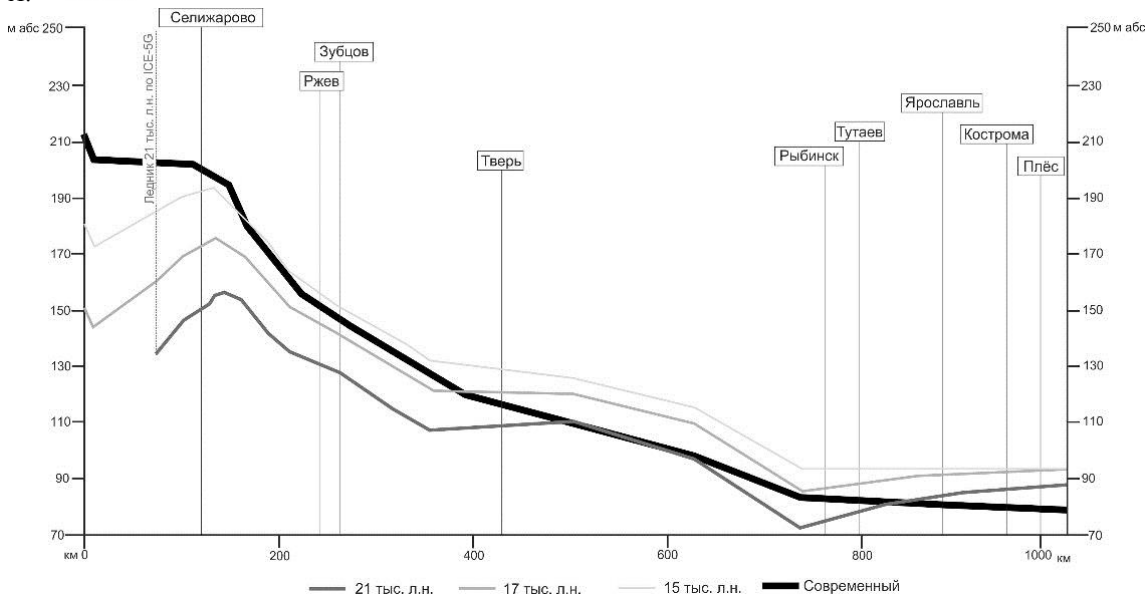


Рис. 3. Изменения топографии по данным ICE-6G с поправкой на уровень моря  
 А — 21 тыс. лет назад, Б — 17,5 тыс. лет назад, В — 15 тыс. лет назад, Г — условные обозначения

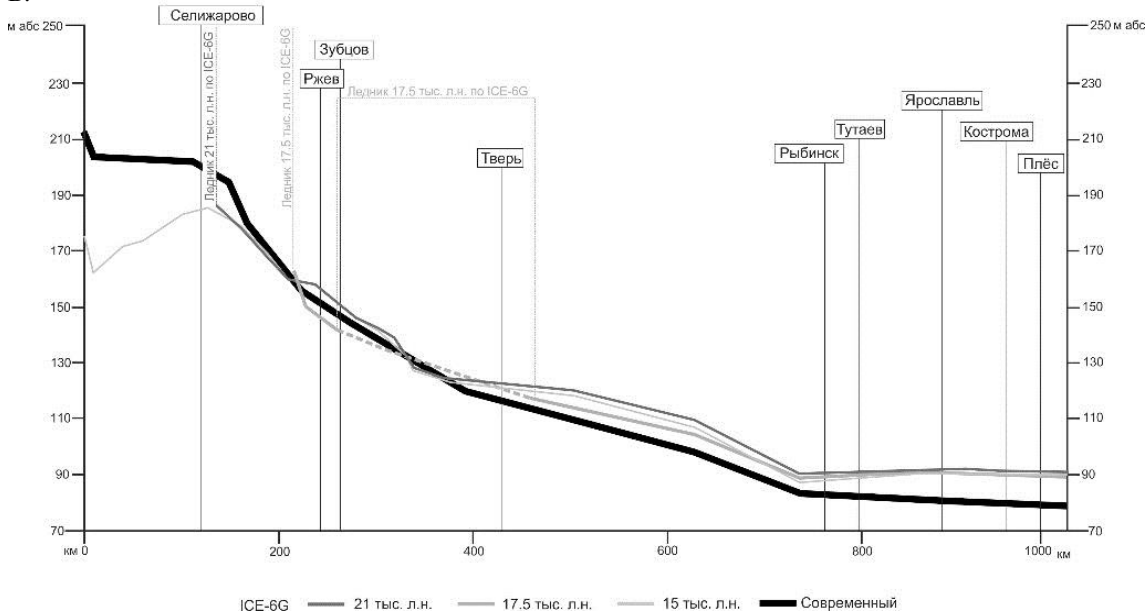


Наиболее важными для данного исследования являются изменения топографии в бассейне Волги. Для наглядной демонстрации того, как именно гляциоизостатические деформации повлияли на сток в долине Волги, по картам с поправками на уровень моря были построены палео-ЦМР. По данным палео-ЦМР нами были построены продольные профили вдоль Волги от истока до Плеса, которые приведены на рисунке 4.

**А. ICE-5G**



**Б. ICE-6G**



**Рис. 4.** Продольные профили верхней Волги, построенные на временные срезы 21 тыс. лет назад, 17 тыс. лет назад и 15 тыс. лет назад по палео-ЦМР, реконструированным с помощью моделей гляциоизостатических деформаций ICE-5G (А), ICE-6G (Б)

При сопоставлении продольных профилей, полученных по современной топографии и по топографии LGM, видно, что гляциоизостатические деформации (формирование приледникового вала) были недостаточно сильными, чтобы вызвать общий «перекос» всего бассейна верхней Волги в сторону ледника, что могло бы привести к образованию обширной системы подпрудных озер. Однако некоторое влияние на рельеф бассейна верхней Волги гляциоизостазия все же оказала. Обе модели демонстрируют общее поднятие профиля Волги в области приледникового вала от Рыбинска до Плёса, где видно уменьшение уклона дна долины до нулевых величин (рис. 4). Также на этом участке по модели ICE-5G 21 тыс. лет назад реконструируется понижение

профиля по сравнению с современным в районе Молого-Шекснинского озера (выше Рыбинска), что можно связывать с заложенной в модель границей ледника: этот участок Волги попадает на край приледникового прогиба (рис. 2А).

Подобное падение уклона могло бы повлечь за собой замедление стока и формирование озера или аккумуляцию выше по долине. Дальнейшее опускание приледникового вала вызвало бы врезание реки и восстановление речного режима, если происходило бы формирование озер. Опускание вала реконструируется только по модели ICE-6G (рис. 4Б). Для более точных реконструкций в данном случае необходимы геологические данные: наличие отложений аллювиального или озерного генезиса соответствующего возраста (времени дегляциации) помогло бы уточнить тип водного режима — речной или озерный. Тем не менее даже в случае возникновения озер они бы не заняли весь бассейн Волги, а только его часть с нулевыми и близкими к отрицательным уклонами.

Более явные деформации выявлены в самых истоках Волги в пределах приледникового прогиба, где формировался обратный уклон. Это могло обусловить временную реверсию там стока в северо-западном направлении или формирование приледникового озера.

### Заключение

В ходе данного исследования построены модели трансформации палеорельефа бассейна верхней Волги под влиянием гляциоизостазии в последнюю ледниковую эпоху. По данным моделирования было установлено, что влияние гляциоизостазии в пределах бассейна верхней Волги изменяло абсолютные отметки территории на первые десятки метров. При этом по всем реконструкциям величина поднятий была гораздо менее значительной (не превышала 20 м), чем опусканий (достигали –59 м). На исследуемой территории по обеим использованным моделям реконструируется картина, соответствующая классической теории гляциоизостазии: у края ледника можно наблюдать приледниковую депрессию, которая, задевая истоки Волги, в среднем через 150–200 км к юго-западу переходит в приледниковый компенсационный вал с осью в районе городов Плёса и Костромы. Соответственно поднятия абсолютных отметок территории приурочены к валу, а опускания — к депрессии.

Реконструкции деформаций продольного профиля Волги показали, что в районе приледникового вала уклоны Волги в LGM могли уменьшаться до нулевых величин, что должно было вызвать речную аккумуляцию в долине на участке Рыбинск — Плёт и даже формирование локального подпрудного озера. Ни для одного временного среза ни по одной модели не выявлено общего перекоса бассейна верхней Волги в сторону ледника. Соответственно гляциоизостатический механизм формирования системы обширных приледниковых озер в бассейне верхней Волги моделированием не подтверждается.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Былинский Е. Н. Валообразные гляциоизостатические поднятия литосферы и их возможное воздействие на расположение залежей нефти и газа на севере Европы // Геоморфология. — 1990. — № 4. — С. 3–13.
2. Былинский Е. Н. Влияние гляциоизостазии на развитие рельефа Земли в плейстоцене. — М. : Национальный геофизический комитет РАН, 1996. — 210 с.
3. Гросвальд М. Г. Евразийские гидросферные катастрофы и оледенение Арктики — М. : Научный мир, 1999. — 120 с.
4. Гросвальд М. Г., Котляков В. М. Великая приледниковая система стока Северной Евразии и ее значение для межрегиональных корреляций // Четвертичный период. Палеогеография и литология. — Кишинев : Штиинца, 1989. — С. 5–13.
5. Квасов Д. Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. — СПб. : Наука, 1975. — 278 с.
6. Argus D. F., Peltier W. R., Drummond R., Moore A. W. The Antarctica component of postglacial rebound model ICE-6G\_C (VM5a) based upon GPS positioning, exposure age dating of ice thicknesses, and relative sea level histories // *Geophys. J. Int.* — 2014. — N 198 (1). — P. 537–563. doi:10.1093/gji/ggu140
7. Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A., Chuyko M. Glaciomorphological Map of the Russian Federation // *Quaternary International.* — 2016. — Vol. 420. — P. 4–14. doi: 10.1016/j.quaint.2015.09.024
8. Busschers F. S., Kasse C., Balen R. T. van, Vandenberghe J., Cohen K. M., Weerts H. J. T., Wallinga J., Johns C., Cleveringa P., Bunnik F. P. M. Late Pleistocene evolution of the Rhine-Meuse system in the southern North Sea basin: imprints of climate change, sea-level oscillation and glacio-isostasy // *Quaternary Science Reviews.* — 2007. — N 26. — P. 3216–3248. doi: 10.1016/j.quascirev.2007.07.013

9. Cohen K., Gibbard P., Weerts H. North Sea palaeogeographical reconstructions for the last 1 Ma. // *Netherlands Journal of Geosciences — Geologie En Mijnbouw.* — 2014. — N 93 (1–2). — P. 7–29. doi:10.1017/njg.2014.12
10. Eakins B., Sharman G. Hypsographic curve of Earth's surface from ETOPO1. — Boulder, CO : NOAA National Geophysical Data Center, 2012. — URL : [https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1\\_surface\\_histogram.html](https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1_surface_histogram.html). (Mode of access: 27.10.2019).
11. Farrell W., Clark J. On postglacial sea-level // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* — 1976. — N 46 (3). — P. 647–667. doi:10.1111/j.1365-246X.1976.tb01252.x
12. Hughes A. L. C., Gyllencreutz R., Lohne Ø. S., Mangerud J., Svendsen J. I. The last Eurasian ice sheets — a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1 // *Boreas.* — 2016. — N 45. — P. 1–45. doi:10.1111/bor.12142
13. Lambeck K., Chappell J. Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle // *Science.* — New York, 2001. — Vol. 292. — P. 679–686. doi: 10.1126/science.1059549
14. Panin A., Adamiec G., Filippov V. Fluvial response to proglacial effects and climate in the upper Dnieper valley (Western Russia) during the Late Weichselian and the Holocene // *Quaternaire.* — 2015. — 26 (1). — P. 27–48. doi:10.4000/quaternaire.7141
15. Panin A., Astakhov V., Komatsu G., Lotsari E., Lang J., Winsemann J. Middle and Late Quaternary glacial lake-outburst floods, drainage diversions and reorganization of fluvial systems in northwestern Eurasia // *Earth-Science Reviews.* — 2020. — Vol. 201. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.103069
16. Peltier W. R., Argus D. F., Drummond R. Space geodesy constrains ice-age terminal deglaciation: The global ICE-6G\_C (VM5a) model // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* — 2015. — N 120. — P. 450–487. doi:10.1002/2014JB011176
17. Peltier W. R. FRSC. Datasets: ICE-6G\_C, ICE-5G. — URL : <http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/~peltier/data.php> (Mode of access: 31.01.2020).
18. Peltier W. R. Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* — 2004. — N 32. — P. 111–149. doi:10.1146/annurev.earth.32.082503.144359
19. Peltier W. R. The impulse response of a Maxwell Earth // *Rev. Geophys.* — 1974. — N 12 (4). — P. 649–669. doi: 10.1029/RG012i004p00649
20. Wallinga J., Törnqvist T. E., Busschers F.S., Weertsz H. J. T. Allogenic forcing of the late Quaternary Rhine-Meuse fluvial record: the interplay of sea-level change, climate change and crustal movements // *Basin Research.* — 2004. — N 16 (4). — P. 535–547. doi: 10.1111/j.1502-3885.2008.00025.x

#### *Сведения об авторе*

**Уткина Анна Олеговна** — аспирант, инженер-исследователь лаборатории эволюционной географии Института географии Российской академии наук.

Сфера научных интересов: геоморфология и эволюционная география.

Контактная информация: электронный адрес: owl\_sherry@mail.ru

**A. O. Utkina**

#### **The Influence of Glacial Isostatic Adjustment on the River Flow of the Upper Volga during the Last Glacial Period <sup>2</sup> \***

The likelihood of the formation of large proglacial lakes in the Upper Volga basin during the Last Glacial Period is a palaeographic issue that needs to be further investigated. Proglacial lakes are believed to have formed by the damming action of the moraine (which modern scientists consider rather doubtful) or due to postglacial rebound. The research reconstructs topographic changes of the Upper Volga basin on the basis of glacial isostatic adjustment models (ICE-5G and ICE-6G L. Peltier). The analysis of reconstructed river profiles shows that the adjustment was not sufficient to block the flow and to form large barrier lakes. Local lakes can be found in the source of the Volga River and in the Upper Volga downstream known for the glacier compensation effect resulting in the reduction of longitudinal slope. The reduction of longitudinal slope caused an intensive directed accumulation, deglaciation cutting and pre-glacial upland immersion. The used strategy can be employed to assess the influence of glacial isostatic adjustment on glacial areas. It can also be used by researchers who employ glacial isostatic adjustment models.

*Valdai glaciation; Upper Volga; glacial isostatic adjustment; glacial isostatic compensation; pre-glacial upland; proglacial lakes*

---

<sup>2</sup> The work is performed within the framework of the ПФФ 17-17-01289 project.

\* Utkina A. O. The Influence of Glacial Isostatic Adjustment on the River Flow of the Upper Volga during the Last Glacial Period. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo universiteta imeni S. A. Esenina* [The Bulletin of Ryazan State University named for S. A. Yesenin]. 2020, no. 3 (68), pp. 116–129. (In Russian). <https://doi.org/10.37724/RSU.2020.68.3.013>

## REFERENCES

1. Bylinskij E. N. Glacial Isostatic Rebound of the Lithosphere and their Potential Impact on the Location of Oil and Gas Fields in Northern Europe. *Geomorfologija* [Geomorphology]. 1990, no. 4, pp. 3–13. (In Russian).
2. Bylinskij E. N. *Vlijanie glacioizostazii na razvitie rel'efa Zemli v plejstocene* [The Influence of Glacial Isostatic Adjustment on Pleistocene Evolution of Relief]. Moscow, National Geophysical Committee of the Russian Academy of Sciences Publ., 1996, 210 p. (In Russian).
3. Grosval'd M. G. *Evrazijskie gidrosfernye katastrofy i oledenenie Arktiki* [Eurasian Hydrosphere Catastrophes and Glaciation of the Arctic]. Moscow, Scientific World Publ., 1999, 120 p. (In Russian).
4. Grosval'd M. G., Kotljakov V. M. The Great Proglacial Lake System of Northern Eurasia and its Role in the Interregional Correlations. *Chetvertichnyj period. Paleogeografija i litologija* [The Quaternary Period. Palaeography and Lithology]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1989, pp. 5–13. (In Russian).
5. Kvasov D. D. *Pozdnechetvertichnaja istorija krupnyh ozer i vnutrennih morej Vostochnoj Evropy* [The Late Quaternary History of Large Lakes and Inner Seas of Eastern Europe]. St. Petersburg, Science Publ., 1975, 278 p. (In Russian).
6. Argus D. F., Peltier W. R., Drummond R., Moore A. W. The Antarctica Component of Postglacial Rebound Model ICE-6G\_C (VM5a) Based upon GPS Positioning, Exposure Age Dating of Ice Thicknesses, and Relative Sea Level Histories. *Geophys. J. Int.* 2014, no. 198 (1), pp. 537–563. doi:10.1093/gji/ggu140
7. Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A., Chuyko M. Glaciomorphological Map of the Russian Federation. *Quaternary International.* 2016, vol. 420, pp. 4–14. doi: 10.1016/j.quaint.2015.09.024
8. Busschers F. S., Kasse C., Balen R. T. van, Vandenberghe J., Cohen K. M., Weerts H. J. T., Wallinga J., Johns C., Cleveringa P., Bunnik F. P. M. Late Pleistocene Evolution of the Rhine-Meuse System in the Southern North Sea Basin: Imprints of Climate Change, Sea-Level Oscillation and Glacio-Isostasy. *Quaternary Science Reviews.* 2007, no. 26, pp. 3216–3248. doi: 10.1016/j.quascirev.2007.07.013
9. Cohen K., Gibbard P., Weerts H. North Sea Palaeogeographical Reconstructions for the Last 1 Ma. *Netherlands Journal of Geosciences — Geologie En Mijnbouw.* 2014, no. 93 (1–2), pp. 7–29. doi:10.1017/njg.2014.12
10. Eakins B., Sharman G. Hypsographic Curve of Earth's Surface from ETOPO1. Boulder, CO : NOAA National Geophysical Data Center. 2012. Available at : [https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1\\_surface\\_histogram.html](https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1_surface_histogram.html). (Mode of access: 27.10.2019).
11. Farrell W., Clark J. On Postglacial Sea-level. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1976, no. 46 (3), pp. 647–667. doi:10.1111/j.1365-246X.1976.tb01252.x
12. Hughes A. L. C., Gyllencreutz R., Lohne Ø. S., Mangerud J., Svendsen J. I. The Last Eurasian Ice Sheets — a Chronological Database and Time-slice Reconstruction, DATED-1. *Boreas.* 2016, no. 45, pp. 1–45. doi: 10.1111/bor.12142
13. Lambeck K., Chappell J. Sea Level Change through the Last Glacial Cycle. *Science.* New York, 2001, vol. 292, pp. 679–686. doi: 10.1126/science.1059549
14. Panin A., Adamiec G., Filippov V. Fluvial Response to Proglacial Effects and Climate in the Upper Dnieper Valley (Western Russia) during the Late Weichselian and the Holocene. *Quaternaire.* 2015, 26 (1), pp. 27–48. doi:10.4000/quaternaire.7141
15. Panin A., Astakhov V., Komatsu G., Lotsari E., Lang J., Winsemann J. Middle and Late Quaternary Glacial Lake-outburst Floods, Drainage Diversions and Reorganization of Fluvial Systems in Northwestern Eurasia. *Earth-Science Reviews.* 2020, vol. 201. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.103069
16. Peltier W. R., Argus D. F., Drummond R. Space Geodesy Constrains Ice-age Terminal Deglaciation: The Global ICE-6G\_C (VM5a) Model. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2015, no. 120, pp. 450–487. doi:10.1002/2014JB011176
17. Peltier W. R. FRSC. Datasets: ICE-6G\_C, ICE-5G. Available at : <http://www.atmosph.physics.utoronto.ca/~peltier/data.php> (accessed: 31.01.2020).
18. Peltier W. R. Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE. *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 2004, no. 32, pp. 111–149. doi: 10.1146/annurev.earth.32.082503.144359
19. Peltier W. R. The Impulse Response of a Maxwell Earth. *Rev. Geophys.* 1974, no. 12 (4), pp. 649–669. doi: 10.1029/RG012i004p00649
20. Wallinga J., Törnqvist T. E., Busschers F. S., Weertsz H. J. T. Allogenic Forcing of the Late Quaternary Rhine-Meuse Fluvial Record: the Interplay of Sea-level Change, Climate Change and Crustal Movements. *Basin Research.* 2004, no. 16 (4), pp. 535–547. doi: 10.1111/j.1502-3885.2008.00025.x

*Information about the authors*

**Utkina Anna Olegovna** — Postgraduate student, Engineering Researcher at the Laboratory of Evolutionary Geography of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.  
Research interests: geomorphology and evolutionary geography.  
Contact information: e-mail: owl\_sherry@mail.ru

*Поступила в редакцию 15.05.2020*

*Received 15.05.2020*