

Цифровая модель озерной системы Тургояк, Южный Урал

И.Ю. Чернова, Л.Р. Косарева*, Н.Г. Нургалиева, О.С. Чернова

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Донные отложения озера Тургояк (Южный Урал, Россия) формировались на протяжении позднего плейстоцена и голоцена. Литогенез озерных осадков контролируется морфометрией озера, положением дренажных сетей, вертикальной зональностью и термическим состоянием водной толщи, а также ветровым воздействием.

В связи с этим актуальным является анализ картографических материалов, по которым можно представить геологическое строение района озера, характер рельефа, дренажных сетей, водосборов и водоразделов. Все эти аспекты важны для оценки роли источников и путей транспортировки, а также механизмов распределения материала, образующего озерные осадки. Изучение озерных отложений ценно для генетической интерпретации осадочных последовательностей в свете палеоклиматических и палеоэкологических трендов и событий.

В данной статье представлена цифровая модель рельефа озера Тургояк и его обрамления. Цифровое моделирование реализовано в среде ГИС на основе доступных картографических материалов по геологическому строению, топографии местности и батиметрии озера. Наложение модели водосбора на геологические карты дочетвертичных образований и четвертичных отложений позволило сделать предположение о вещественном составе материала, сносимого в озеро.

Создание аналогичных цифровых моделей для озерных систем Урала и других регионов России и мира открывает возможности на новом уровне систематизировать информацию и использовать ее для различных реконструктивных целей.

Ключевые слова: озеро Тургояк, Южный Урал, цифровая модель рельефа, геоинформационные системы, гидрология, озерное осадконакопление

Для цитирования: Чернова И.Ю., Косарева Л.Р., Нургалиева Н.Г., Чернова О.С. (2025). Цифровая модель озерной системы Тургояк, Южный Урал. *Георесурсы*, 27(2), с. 264–280. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.2.20>

Введение

Озеро Тургояк является уникальным природным объектом и одним из крупных резервуаров питьевой воды на Южном Урале. Его по праву называют «младшим братом Байкала» за чистоту и прозрачность воды. Озеро имеет статус памятника природы областного значения с 1961 года. Следует отметить, что это одно из детально исследуемых озер Южного Урала в различных аспектах: гидрография, экология, геология, климатология (Андреева, 1973; Рогозин, Ткачев, 1998; Гаврилкина и др., 1998; Диянова, Дерягин, 2010; Захаров 2020; Zakharov, 2021; Kostryukova et al., 2022; Масленникова и др., 2018; Косарева и др., 2023 и др.).

Донные отложения озера Тургояк формировались на протяжении позднего плейстоцена и голоцена; возраст озера не менее 25 тыс. лет (Масленникова и др., 2018; Косарева и др., 2023). Литогенетические особенности

донных отложений озера обусловлены, главным образом, начальными стадиями литогенеза: гипергенезом и седиментогенезом в условиях высокой чувствительности озерной системы к климатическим изменениям. Последние влияют на интенсивность мобилизации осадочного материала в ультимативной провинции, на водораздельных и водосборных участках, на путях транспортировки материала и в области его разгрузки. Распределение осадочного материала внутри водоема во время седиментации контролируется морфометрией озера, положением дренажных сетей, вертикальной зональностью, термическим состоянием водной толщи, а также ветровым воздействием.

Картирование озерных систем с применением геоинформационных систем (ГИС) в мировой практике используется для решения различных задач. Примером могут служить исследования, направленные на изучение наводнений, вызванных прорывом ледниковых озер Лахул и Спити (Округ Химачал-Прадеш, Индия) (Rongali et al., 2024). Картирование с использованием ГИС и мониторинг термокарстовых озер (озера, расположенные в бассейне реки Бейлухэ на центральном Тибетском нагорье и на севере полуострова Сьюард на западе Аляски) позволило изучить воздействие климатических изменений на регионы

* Ответственный автор: Лина Раисовна Косарева
e-mail: lina.kosareva@mail.ru

© 2025 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

вечной мерзлоты и дать количественную оценку выбросов углекислого газа (Qin et al., 2023). Геоинформационные системы применялись при изучении морфометрических изменений озера Хавасса (Эфиопская рифтовая долина, Южный регион, Эфиопия), являющегося жизненно важным для местного населения (Menberu et al., 2021). Исследования озера Бурулус (к северу от дельты Нила в Египте) подтверждают важность картирования с применением ГИС при проведении экологических исследований и изучении загрязнения поверхностных вод в условиях постоянно растущей потребности в воде при интенсивном сельском хозяйстве и экономическом росте (Masoud et al., 2021).

В России ГИС были применены, например, при определении морфометрических характеристик и создании цифровых моделей котловин ряда озер Нижегородской области (Артаев, Баянов, 2015; Асташин и др., 2016).

Для геоэкологического мониторинга системы озера Байкал созданы информационно-картографические сервисы, где в открытом доступе хранятся результаты мониторинга и картографические ресурсы (сайт лаборатории геоинформационных систем БИП СО РАН: <https://baikalgis.com/category/gis-monitoring>).

Для осуществления моделирования изменения рельефа котловины в прошлом и трехмерного моделирования современных озерных процессов, для уточнения основных морфометрических характеристик водоема и его отдельных районов была разработана современная цифровая батиметрическая модель Онежского озера (Потахин и др., 2024).

В связи с этим актуальной задачей выступает анализ картографических материалов, по которым можно представить геологическое строение района озера, характер рельефа, дренажных сетей, водосборов и водоразделов. Все эти аспекты важны для оценки роли источников и путей транспортировки, а также механизмов распределения материала, образующего озерные осадки. Следует отметить, что выявление источников и путей поступления загрязнителей в озеро также является одной из актуальных задач.

Среда ГИС предлагает набор специализированных инструментов для выявления особенностей пространственного распределения заданных объектов. Цифровые модели рельефа (ЦМР) являются ценным источником высотной информации, где представление территории в виде регулярной сетки позволяет применять широкий набор морфометрических методов анализа ЦМР, включая построение поверхностей уклона и направлений стока, моделирование дренажных сетей, областей водосбора и др.

Целью данной работы является создание (на основе существующих картографических материалов) цифровой модели озерной системы Тургояк, включая геологию, рельеф, положение предельного уровня воды, батиметрию, водосборы, водоразделы и дренажные сети.

Объект исследований

Тургояк – это олиготрофное, проточное озеро, расположенное в узкой межгорной котловине, зажатой между хребтами Урал-Тау и Ильменский (рис. 1с). Область водосбора озера весьма ограничена, т.к. она определяется не крупными горными сооружениями, а относительно

невысокими хребтами и цепочками отдельных сопков, обступающими озеро со всех сторон. Хребет Заозерный полукольцом ограничивает область водосбора с запада и частично с юга и севера. Цепи невысоких вершин и сопков также полукольцом ограничивают область водосбора с востока, севера и юга (рис. 1д).

Основные морфометрические параметры озера таковы: высота над уровнем моря 320 м, площадь водной поверхности 26.4 км², средняя глубина 19.2 м (Андреева, 1973; Захаров, 2020), максимальная глубина от – 34 м (Андреева, 1973) до 32.5 м (Захаров, 2020). Значение средней глубины – самое большое среди всех тектонических озер Южного Урала.

Форма береговой линии озера близка к округлой в восточной части. В западной части озеро имеет неровную изрезанную береговую линию с множеством мысов и заливов. Западные и особенно восточные берега высокие, зачастую обрывистые, высотой до 50–100 м (Захаров, 2020). По данным сейсмоакустических исследований (Косарева и др., 2023) дно неровное, расчленено выходами подводных гряд и гольцов, самые крупные из которых поднимаются в виде островов. На Тургояке насчитывается 6 островов, наиболее крупный – остров Веры, известный своим мегалитическим комплексом (Grigoriev, Vasina, 2019).

Остров Веры – целостный историко-культурный и природный комплекс, являющийся объектом культурного наследия регионального значения. На нем располагаются 38 памятников археологии, относящиеся к разным эпохам. Самый древний из них датируется эпохой палеолита (100–40 тыс. л. н.) самый поздний комплекс – руины старообрядческого скита – XIX в. Наиболее ярко на острове представлена эпоха энеолита (IV–III тыс. лет до н. э.) тремя камерными мегалитами и святилищами (Grigoriev, Vasina, 2019; Григорьев, Васина, 2020).

Озерная котловина тектонического происхождения расположена на территории Тургоякского гранитоидного массива, представляющего собой шток округлой формы. Значительная его часть скрыта озерными водами (Петров и др., 2015; Сначев и др. 2020; Ферштатер и др., 2000). Тургоякский массив относится к тургоякско-сыростанскому комплексу ($\gamma\delta C_{1-2}ts$) монцодиорит-гранитной формации. Интрузив сложен преимущественно гранодиоритами, реже кварцевыми диоритами и гранитами внедрения. С вмещающими породами массив имеет интрузивные контакты, что выражается в их ороговиковании и превращении в мелкозернистые амфиболовые роговики (Сначев и др., 2020; Ферштатер и др., 2000).

Амфибол-биотитовые гранодиориты представляют собой преимущественно гнейсовидные, часто порфирированные породы, состоящие из плагиоклаза, калиевого полевого шпата (микроклин-пертита), кварца, биотита, амфибола (роговой обманки) и аксессуарных минералов (сфен, апатит, эпидот, гранат, циркон, пирит, магнетит). Граниты сложены биотитовыми, реже амфибол-биотитовыми разностями в состав которых входят: олигоклаз, микроклин или ортоклаз, кварц, биотит, роговая обманка и аксессуарные минералы – сфен, эпидот, апатит, гранат, пирит. Породы Тургоякского интрузива характеризуются повышенной щелочностью (Шагалов, 2000; Сначев и др., 2020; Петров и др., 2015).

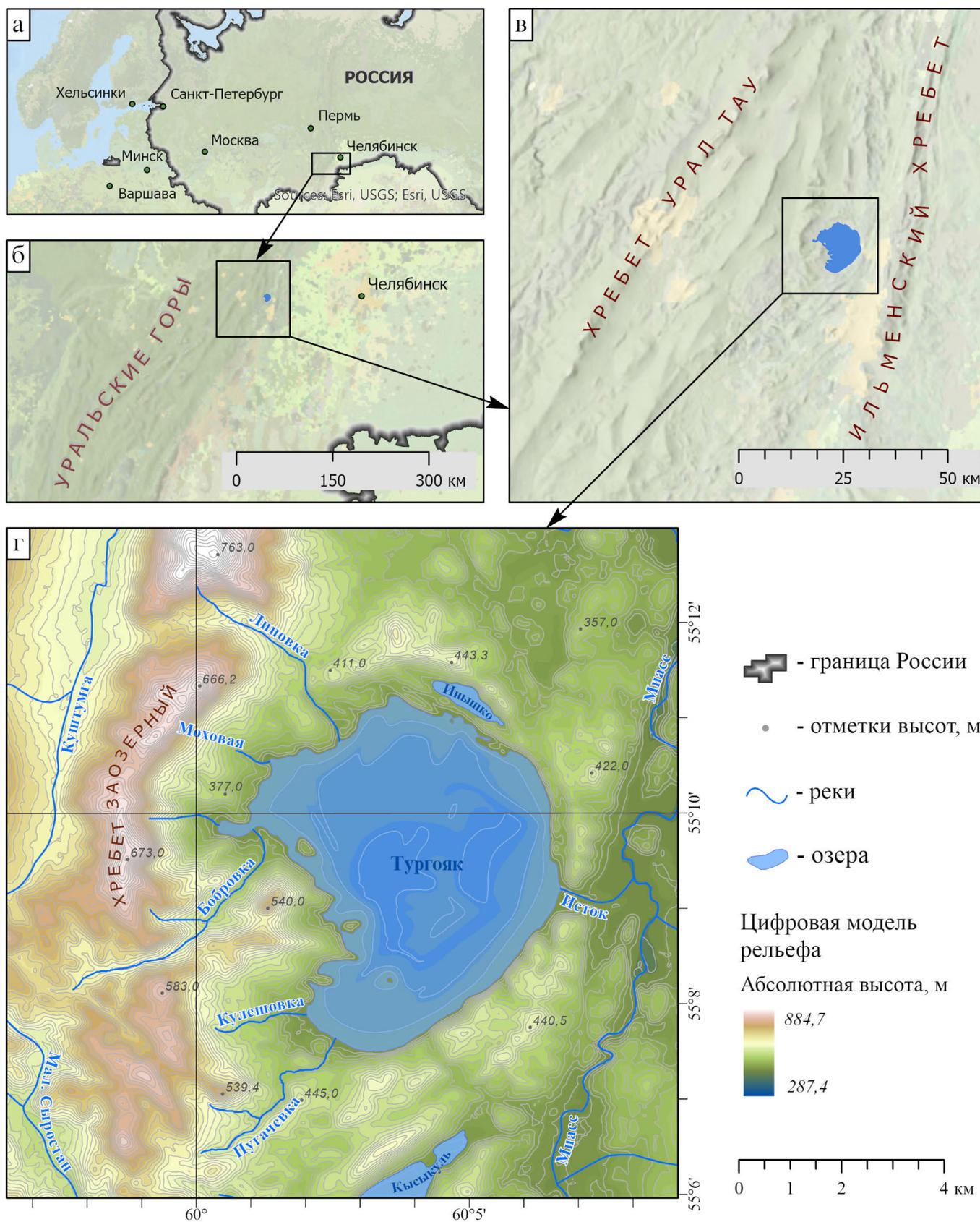


Рис. 1. Обзорная карта: а) область исследования на карте России; б) регион Южного Урала; в) расположение озера Тургойак в межгорной котловине; г) рельеф и гидрография области исследования.

Гидрографическая сеть Тургояка представлена реками и ручьями – Липовка, Бобровка, Кулешовка, Пугачёвка, Моховая, Угольный, Крутая (Захаров, 2018). Это сравнительно небольшие речки, стекающие с окрестных хребтов. Помимо этого, экспедиция «Тургояк-2021» обнаружила еще 3 постоянных водотока (Мишуткина и др., 2021). Из юго-восточной части озера вытекает только одна небольшая речка Исток, соединяющая озеро с рекой Миасс (рис. 1d).

Из-за малых размеров водосбора роль поверхностного стока в водном питании озера невелика. Основную роль в питании озера играют грунтовые воды. На площади водосбора расположено также озеро Инышко, имеющее неявную связь с Тургояком. Водоемы разделены узким 200-метровым перешейком. Известно о гидравлической связи озер (Special Protection Natural Areas of Russia 2024), но возможны также переливы через перешеек.

При расчете водосборной модели область водосбора озера Инышко рассматривалась как часть области водосбора озера Тургояк.

Материалы и методы

Для составления наиболее полной цифровой модели озерной системы в геоинформационный проект были добавлены слои цифровой Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200000, листы N-41-VII и N-40-XII (Петров и др., 2003; Аулов и др., 2015). Геологические карты были предоставлены ВСЕГЕИ (<https://karpinskyinstitute.ru>) по запросу. Для построения модели использовались карты дочетвертичных образований и четвертичных отложений.

Геологические слои были обрезаны по рамке области исследования. Также на границе смежных листов была выполнена подгонка границ (согласование формы) геологических полигонов, проверка и корректировка их атрибутов. В итоге была получена бесшовная цифровая геологическая карта области исследования дочетвертичных образований (рис. 2) и четвертичных отложений (рис. 3).

Цифровая модель рельефа и инструменты гидрологического моделирования

Для создания цифровой модели рельефа (ЦМР), изображенной на рисунке 1d, были использованы все доступные источники информации о топографии местности, а также результаты батиметрии озера Тургояк (Тургояк. Озеро-памятник..., 1993; Захаров, 2018). ЦМР включает в себя не только наземный рельеф, но и рельеф дна озера.

Основным источником информации для расчета ЦМР является модель Copernicus DEM GLO-30, поставляемая Европейским космическим агентством. Copernicus DEM – это цифровая модель поверхности (DSM), которая представляет поверхность Земли, включая здания, инфраструктуру и растительность. Данные доступны с разрешением 1 угловая секунда (приблизительно 30 м). Точность модели по вертикали составляет 4 м, по горизонтали 6 м. Дополнительным источником информации об абсолютных отметках высот наземной части ЦМР являлись планшеты топографических карт масштаба 1:100000, листы N40-36 и N41-25. Отметки высот (точки) и изолинии глубин озера (линии) были оцифрованы по изображениям планшетов топокарт и карты из (Тургояк. Озеро-памятник..., 1993) и внесены в геоинформационный проект.

Все операции предварительной обработки входных данных, гидрологического моделирования и создания компоновок карт были выполнены в ArcGIS Pro 3.0.2. с использованием дополнительного модуля Spatial Analyst (ESRI ArcGIS Pro 2024).

Поскольку модель Copernicus DEM является цифровой моделью местности, а не цифровой моделью рельефа, потребовались процедуры очистки модели от высот, связанных с техногенными объектами, а также процедуры сглаживания и устранения шероховатости поверхности, обусловленной растительностью, мелкими объектами, дефектами обработки спутниковых данных и прочими причинами.

Для создания гладкой ЦМР, пригодной для гидрологического моделирования, были выполнены следующие операции по обработке входных данных:

Шаг 1. Извлечение изолиний из DSM (инструмент Contour). Далее было выполнено преобразование формирующих вершин изолиний в точки с сохранением атрибута высоты (инструмент Feature Vertices To Points). Далее в режиме редактирования было выполнено удаление точек, связанных с дорожным полотном.

Шаг 2. Расчет ЦМР с помощью инструмента Topo to Raster (Spatial Analyst), в котором в качестве входных данных были установлены точки, полученные на предыдущем шаге обработки, точки – отметки высот, снятые с топографических карт масштаба 1:100000, изолинии, представляющие рельеф дна озера. В заключении рассчитанная ЦМР была сглажена с помощью инструмента Focal Statistics (Spatial Analyst) с окрестностью обработки 10 x 10 ячеек и типом статистики Mean.

Гидрологическое моделирование и расчет областей водосбора были выполнены с использованием набора инструментов Hydrology модуля Spatial Analyst (ESRI ArcGIS Pro 2024). К ЦМР были последовательно применены следующие инструменты геообработки.

- FILL заполняет локальные понижения в растре поверхности для устранения небольших дефектов в ЦМР, препятствующих расчету дренажной сети. Создает растр DEMFill.

- FLOW DIRECTION из DEMFill выводит растр FlowDirDEM, показывающий направление потока из каждой ячейки растра.

Далее растр FlowDirDEM использовался дважды: для расчета площади водосбора и для расчета дренажной сети.

Площади водосборов были получены с помощью инструмента WATERSHED.

Для того чтобы рассчитать сети водотоков и определить точки источников были применены следующие инструменты.

- FLOW ACCUMULATION из растра FlowDirDEM вычисляет суммарный сток. Суммарный сток равен числу всех ячеек, сток из которых попадает в каждую ячейку вниз по склону. Ячейки с высоким скоплением стока представляют собой области концентрированного стока и могут использоваться для идентификации русел водотоков. Создает растр FlowAccDEM.

- Функция CON Калькулятора растра выделяет из FlowAccDEM растровую сеть водотоков.

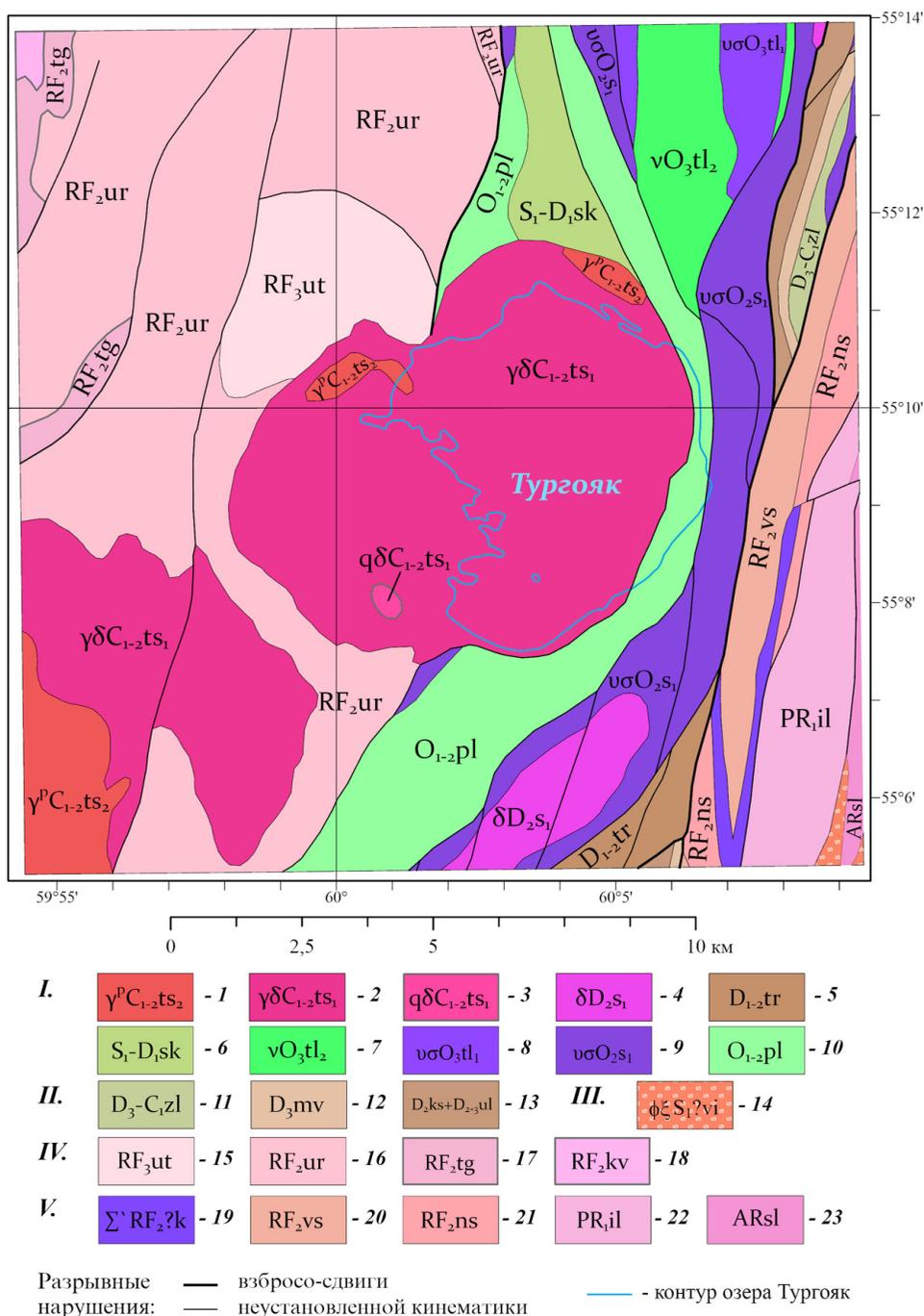


Рис. 2. Цифровая модель геологической карты дочетвертичных образований области исследования, составленная на основе Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200000, листы N-41-VII и N-40-XII (Петров и др., 2003; Аулов и др., 2015). Условные обозначения к рисунку 2: I. Вознесенско-Присакмарская структурно геологическая зона: 1 – Тургойско-сыростанский комплекс диорит-гранодиорит-гранитовый. Вторая фаза: граниты двуполевошпатовые с преобладанием плагиоклаза; дайки гранитов, дайки умеренно-щелочных гранитов ($\epsilon\gamma$), гранит-порфиров, аплитов. 2 – Тургойско-сыростанский комплекс диорит-гранодиорит-гранитовый. Первая фаза: гранодиориты, кварцевые диориты ($q\delta$); дайки гранодиоритов; гранодиорит-порфиров. 3 – Тургойско-сыростанский комплекс диорит-гранодиорит-гранитовый. Первая фаза: кварцевые диориты ($q\delta$). 4 – Салаватский комплекс диорит-плагиогранитовый. Первая фаза: диориты, кварцевые диориты; дайки диоритов; пропилиты. 5 – туратская свита. Полимиктовые конгломераты, песчаники, алевролиты, мраморизованные известняки, мраморы (300–500 м). 6 – поляковская свита. Сланцы углисто-кремнистые и углисто-глинистые (400–500 м). 7 – Таловский комплекс дунит-верлит-клинопироксенит-габбровый. Вторая фаза: габбро. 8 – Таловский комплекс дунит-верлит-клинопироксенит-габбровый. Первая фаза: клинопироксениты, верлиты; дуниты серпентинизированные (σ). 9 – Сакмарский комплекс габбро-дунит-гарцбургитовый. Первая фаза: дуниты, гарцбургиты серпентинизированные; тальково-карбонатные, тальковые породы; листовениты (l). 10 – поляковская свита. Метабазальты натриевые, афировые, редко порфиоровые, сланцы хлорит-кремнистые, кварциты, метатупфиты кремнистые, вулканомиктовые метапесчаники (800–1000 м). II. Западномагнитогорская структурно геологическая зона: 11 – зилаирская свита. Полимиктовые конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты, кремнисто-глинистые сланцы (500 м). 12 – мукасовская свита. Сланцы кремнистые, кремнисто-глинистые, кремнистые тупфиты, тупфоалевролиты (100 м). 13 – карамалыташская и улутауская свиты объединенные. Базальты амфиболовые, мелкопорфиоровые, гиалобазальты и гиалокластиты, андезибазальты, андезиты, дациты, плагиориодациты, плагиориолиты, их туфы, тупфиты, тупфопесчаники, тупфоалевролиты, кремнисто-глинистые и кремнистые сланцы, яшмы

и известняки. В верхах полимиктовые конгломераты, вулканомиктовые песчаники, алевролиты, кремнистые сланцы (1800 м). III. Сысертско-Ильменогорская структурно геологическая зона: 14 – *Вишневогорско-Ильменогорский комплекс карбонатит-миаскитовый*. Миаскиты биотитовые, биотит-амфиболовые, сиениты биотитовые, амфиболовые, корундовые, нефелин-полевошпатовые пегматиты, карбонатиты, пироксеновые сиениты (Еξ), фениты, биотит-полевошпатовые, пироксен-полевошпатовые и карбонатно-силикатные породы. IV. Центральноуральская мегазона, Златоустовская структурно геологическая зона: 15 – *уйташская свита*. Металесчаники слюдяные, слюдяно-кварцевые сланцы, кварцито-песчаники, кварц-мусковитовые сланцы, прослои «рудных» песчаников с гематитом, ильменитом, магнетитом, цирконом (300 м). 16 – *уреньгинская свита*. Кристаллические сланцы с гранатом, ставролитом, графитом, хлоритоидом, слюдяные кварциты и мраморы (2000 м). 17 – *таганайская свита*. Кварциты, нередко авантюрины, песчаники кварцитовидные, сланцы филлитовидные с хлоритоидом и графитом, двуслюдяные гранат-ставролит-силлиманитсодержащие, конгломераты (200–500 м). 18 – *кувайская свита*. Метатрахириолиты, метариолиты, метатрахириодациты, реже трахириолиты, риолиты, трахириодациты, кристаллические сланцы двуслюдяные кварцевые и полевошпат-кварцевые, полевошпат-эпидот-гранатсодержащие, амфиболиты, сланцы амфиболитовые, метабазальты, сланцы кварц-полевошпат-актинолит-хлоритовые, кварц-полевошпат-эпидот-хлоритовые, кварц-полевошпат-эпидот-роговообманковые, филлитовидные графит-хлоритоидсодержащие, гранат-ставролит-дистен-силлиманитсодержащие, кислые метатифы и метатифобрекчии, кварциты, конгломераты, мраморы доломитовые, кварцито-песчаники (более 3500 м). V – Восточноуральская мегазона, Ильменогорская структурно геологическая зона: 19 – *Каганский комплекс* метаморфизованных ультрамафитов и габридов. Антигоритовые серпентиниты, оливин-антигоритовые, оливин-талкковые, энстатит-талк-антофиллитовые, тремолитовые породы, редко клинопироксениты и габброиды, талькиты. 20 – *верхнесаитовская свита*. Плагийосланцы амфиболовые, гранат-биобит-амфиболовые, амфибол-биотитовые, биотитовые и гранат-биотитовые, прослои графитистых, фосфоритсодержащих кварцитов (560 м). 21 – *нижнесаитовская свита*. Плагийосланцы амфиболовые, прослои биотитовых и гранат-биотитовых плагийосланцев и кварцитов (760 м). 22 – *ильменогорская толща*. Амфиболиты, в том числе с биотитом, гранатом, пироксеном; плагийосланцы биотитовые, амфибол-биотитовые, гранат-биотитовые с силлиманитом, кварциты гранат-биотитовые, графитистые, пироксен-плагийоклазовые кристаллосланцы (600–1100 м). 23 – *селянкинская свита*. Плагийосланцы биотитовые, гранат-биотитовые, иногда с силлиманитом и графитом, амфиболиты с гранатом, клинопироксеном, реже диопсид-плагийоклазовые кристаллосланцы и кварциты (1000 м). 24 – контур современной береговой линии озера Тургояк.

- Функция STREAMORDER определяет порядок потоков в растровой модели, принимая во внимание не только линии водотоков, но и направления максимальных уклонов из каждой ячейки раstra. Метод определения порядка водотока – метод Strahler (Tarboton et al., 1991).

- STREAM TO FEATURE переводит растровую сеть водотоков в векторную модель, в которой для каждого линейного элемента сохранен номер порядка водотока.

По методу Страхлера за поток 1-го порядка принимается начальный поток, в который не впадает никакой другой поток. При слиянии двух потоков 1-го порядка образуется поток 2-го порядка, в который могут впасть потоки 1-го порядка, однако, не повышая его порядка. При слиянии двух потоков 2-го порядка образуется поток 3-го порядка, в который могут впасть потоки 1-го и 2-го порядка, однако, не повышая его порядка, и т.д.

Однопорядковые водотоки (реки) при одинаковых физико-географических и геологических условиях обычно имеют близкие по величине длины, площади бассейнов, расходы и скорости потока. В следствие этого они примерно с одинаковой эрозионной силой воздействуют на рельеф. Следует иметь в виду, что после слияния однопорядковых потоков масса потока примерно удваивается, постепенно возрастая вниз по течению за счет бокового притока и потоков меньших порядков.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 4 демонстрируются этапы и результат создания гладкой ЦМР. На рисунке 4а и врезке 4г показана исходная модель Copernicus DEM. На модели явно прослеживается линейная аномалия высот, связанная с дорожной насыпью. Сильная изрезанность изолиний высот отражает мелкий шум. Результат удаления точек, связанных с дорожным полотном показан на рис. 4б. Рисунки 4в и 4д показывают, что дорожная насыпь из поверхности высот была удалена. Также был удален высокочастотный шум, и в целом поверхность приобрела более гладкий вид, свойственный наземному рельефу.

В результате моделирования ЦМР максимальное значение высоты имеет значение 884.7 м, что с учетом погрешности модели Copernicus DEM соответствует максимальной высоте на топографической карте. Минимальное значение абсолютной высоты имеет значение 287.4 м.

На рисунке 5 представлены результаты гидрологического моделирования. Применение инструментов FILL, FLOW DIRECTION позволило устранить небольшие дефекты в ЦМР, препятствующие расчету дренажной сети (рис. 5а). Области водосбора показаны на рис. 5б.

На рис. 5в показан финальный результат моделирования, полученный путем применения инструментов FLOW ACCUMULATION, CON, STREAMORDER, STREAM TO FEATURE.

На рисунке 6 представлен еще один морфометрический параметр – уклон ЦМР. Уклон оказывает прямое влияние на интенсивность не только линейной, но и плоскостной эрозии и, следовательно, определяет интенсивность стока взвешенных наносов.

При прочих равных условиях скорость потока, изменение его транспортирующей способности зависят от глубины базиса эрозии и формы склонов. При большой крутизне и большой глубине базиса эрозии эрозионная сила достигает максимальных величин.

На рис. 7 и 8 показана совмещенная геолого-гидрологическая модель озерной системы Тургояк. На рис. 7 представлено наложение гидрологической модели на геологическую карту дочетвертичных образований, а на рис. 8 – на карту четвертичных отложений.

Результаты моделирования (рис. 5–7) показали, что общая площадь водосбора озера Тургояк составляет 52.5 км² и состоит из 43 водосборных областей. Из них только четыре области являются крупными (водосборы рек Липовка, Моховая, Бобровка, Кулешовка и Пугачёвка): в сумме они составляют 81% всей области водосбора озера Тургояк. Эти водосборные области обрамляют озеро с северо-запада, запада и юго-запада.

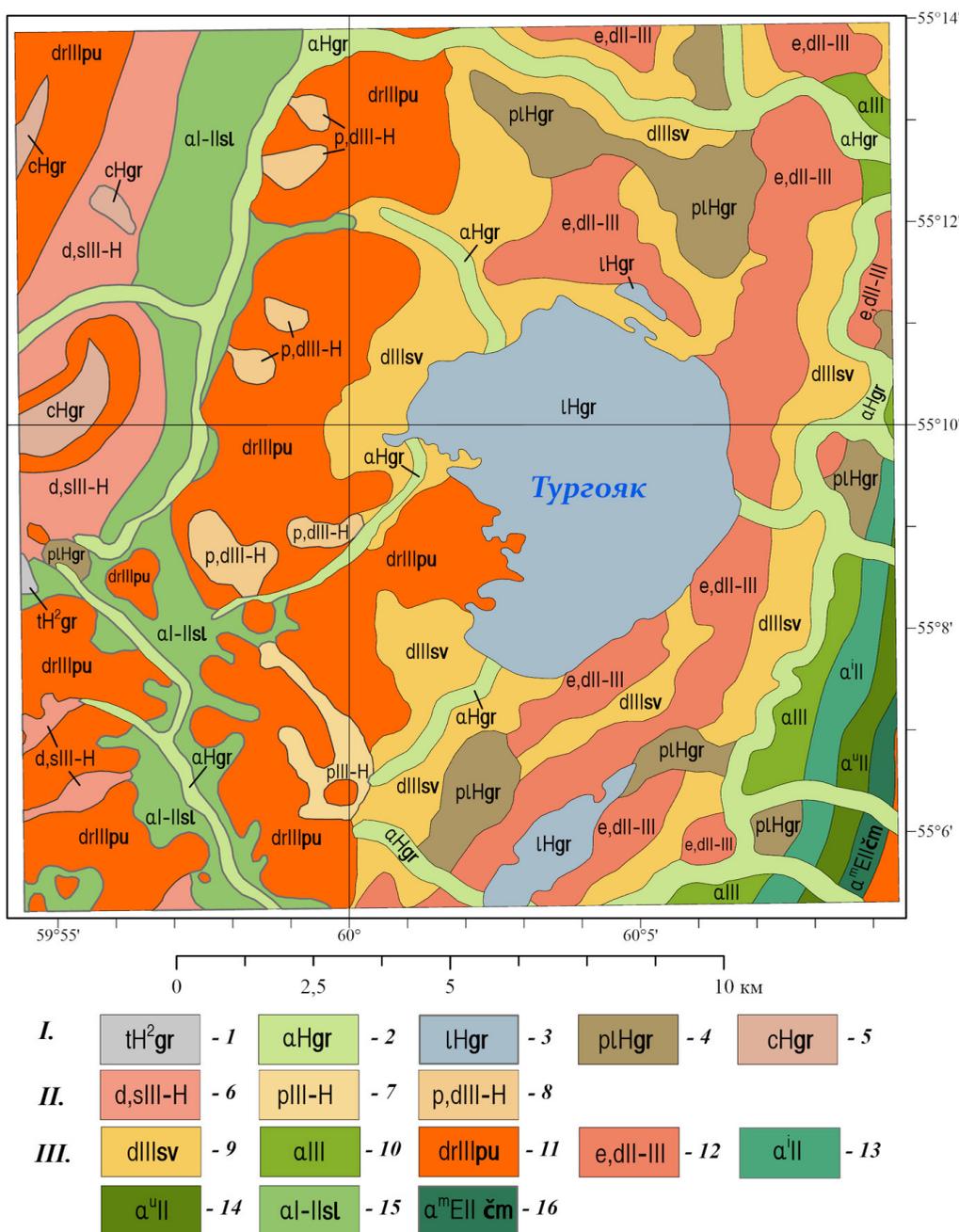


Рис. 3. Цифровая модель геологической карты четвертичных отложений области исследования, составленная на основе Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200000, листы N-41-VII и N-40-XII (Петров и др., 2003; Аулов и др., 2015). Условные обозначения к рисунку 3: I – Голocen. 1 – *горбуновский горизонт*. Верхняя часть. Техногенные образования. Щебень, дресва, глины, пески с гравием, галькой, илы (от 5 до 100 м). 2 – *горбуновский горизонт*. Аллювиальные образования пойменных террас и русел. Пески полимиктовые с гравием, глины илистые, торфянистые, галька, валуны (до 10 м). 3 – *горбуновский горизонт*. Озерные образования. Пески, алевриты, глины иловатые (до 2 м). 4 – *горбуновский горизонт*. Палюстринные образования. Глины иловатые, торфянистые, торф (до 8 м). 5 – *горбуновский горизонт*. Коллювиальные образования. Глыбники, щебень, дресва (до 10 м). II – Верхний неоплейстоцен-голоцен. 6 – Делювиальные и солифлюкционные образования нерасчлененные. Суглинки, глины и супеси с галькой, гравием и щебнем (более 20 м). 7 – Проллювиальные образования. Суглинки и пески глинистые с галькой и валунами (5–10 м). 8 – Проллювиальные и делювиальные образования нерасчлененные. Суглинки и глины с галькой и щебнем, галечники, пески (от 4 до 44 м). III – Плейстоцен. 9 – *североуральский надгоризонт*. Делювиальные образования. Суглинки бурые с дресвой, щебнем и редким гравием местных пород (до 6 м). 10 – Аллювиальные образования камышловской и режевской террас объединенные. Пески полимиктовые с гравием и галькой, глины с примесью песка, глины торфянистые, суглинки, алевриты, гравий, галька (до 18 м). 11 – *полярноуральский горизонт*. Десерпционные образования. Глыбы, щебень, глины песчаные со щебнем (до 15 м). 12 – Элювиально-делювиальные образования. Выветрелый щебень подстилающих пород с суглинистым заполнителем, дресва и редкая галька (до 2 м). 13 – Аллювиальные образования исетской террасы. Суглинки, пески полимиктовые с гравием и галькой (до 15 м). 14 – Аллювиальные образования уфимской террасы. Суглинки, пески полимиктовые, прослойки гравия с галькой (до 20 м). 15 – *Неоплейстоцен. Сылвицкий горизонт*, нерасчлененные. Аллювиальные образования древних речных долин. Суглинки, глины, пески, иногда с гравием, галькой и щебнем, галечники (до 31 м). 16 – *чумлякский горизонт*. Аллювиальные образования миасской террасы. Пески полимиктовые с примесью гравия, суглинки с погребенными почвами, гравий, галька (до 20 м). *Толщины четвертичных отложений указаны для листов N-41-VII и N-40-XII, а не для участка исследований.

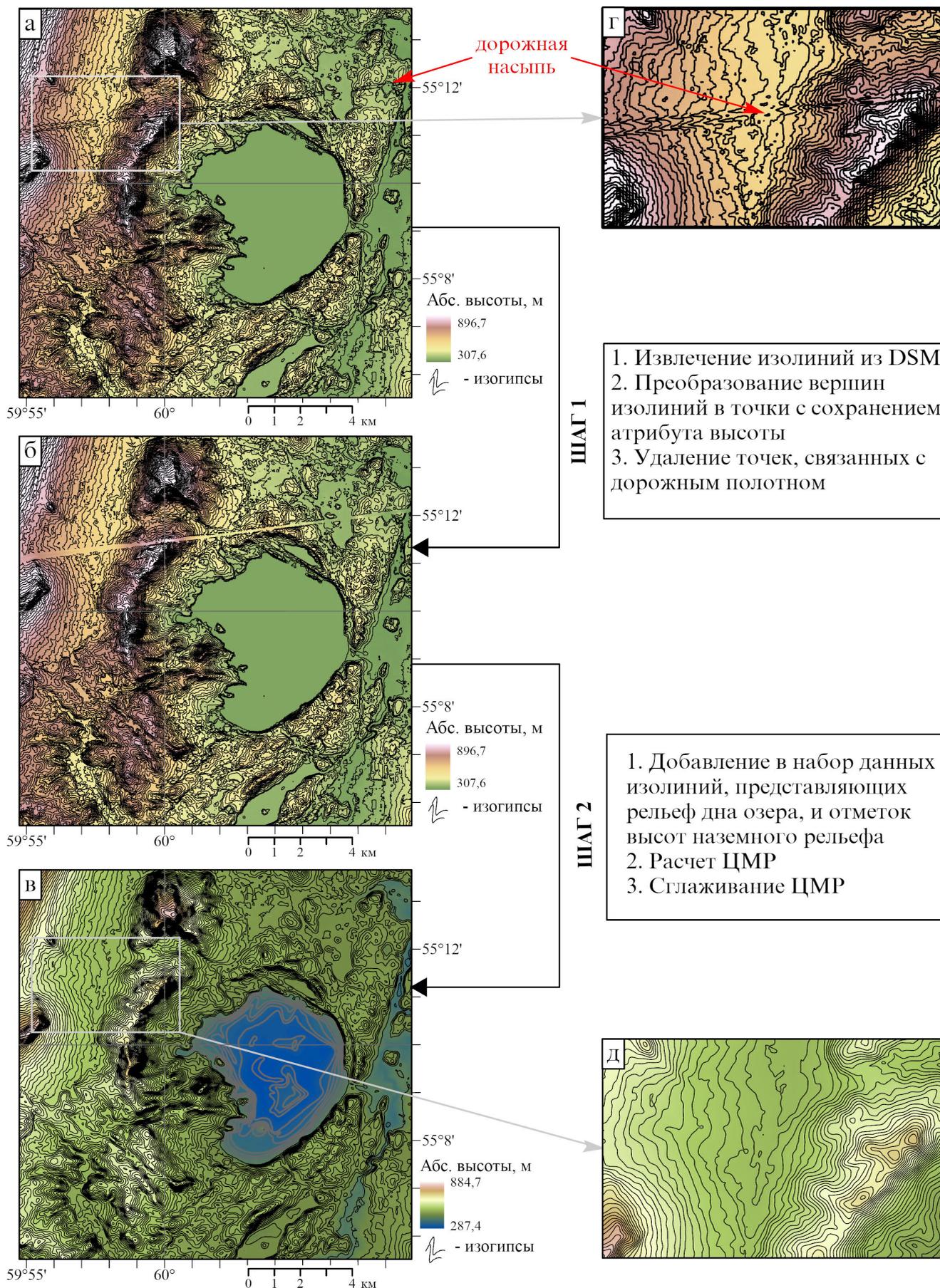


Рис. 4. Этапы создания цифровой модели рельефа: а) DSM с изолиниями высот; б) DSM с изолиниями высот, из которых удалены части, связанные с дорожной насыпью; в) сглаженная цифровая модель рельефа, включающая модель рельефа котловины озера; г) фрагмент рисунка а; д) фрагмент рисунка в. Врезки г и д показывают одну и ту же часть местности.

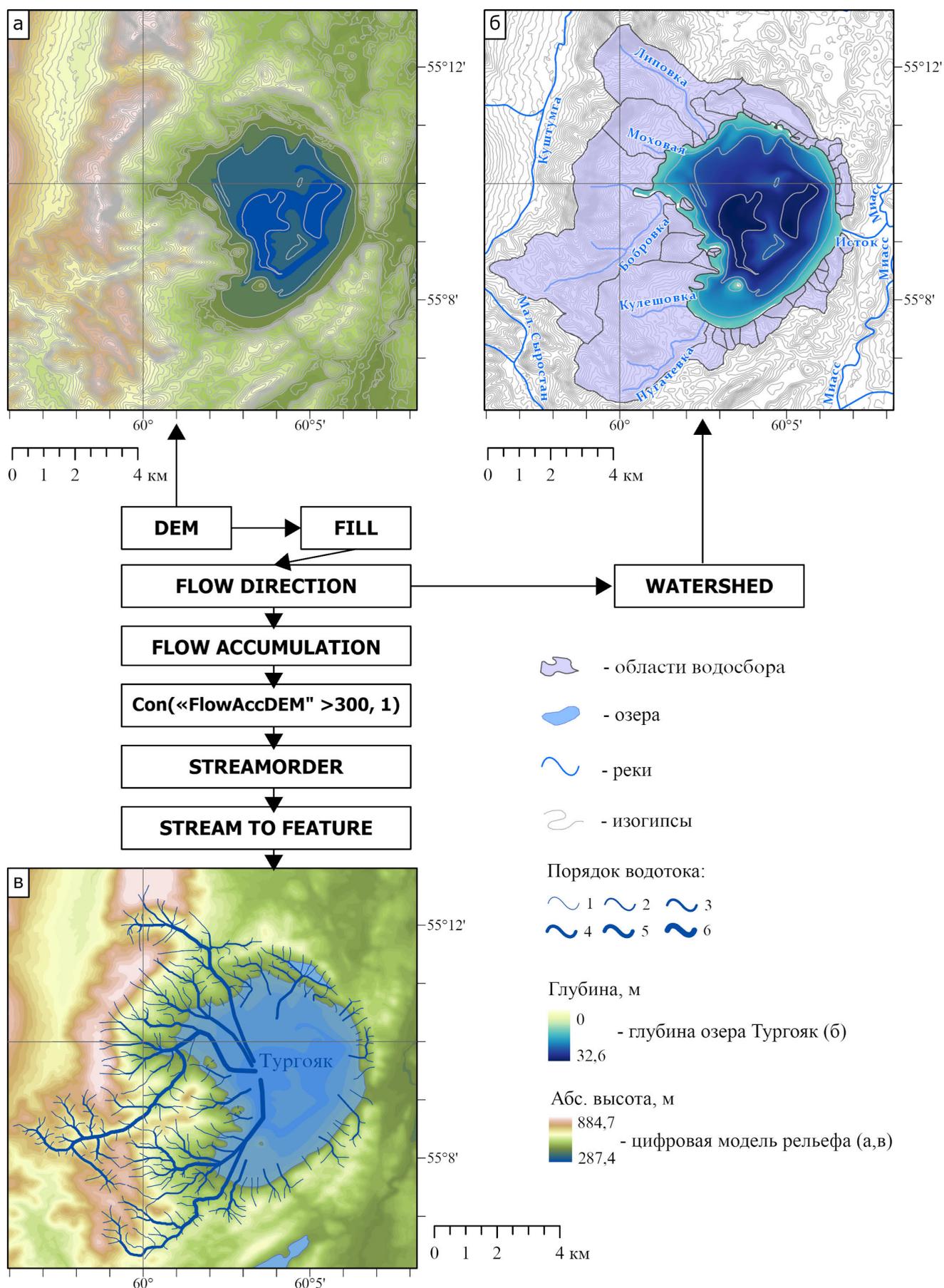


Рис. 5. Результаты гидрологического моделирования: а) цифровая модель рельефа; б) области водосбора; в) сети водотоков.

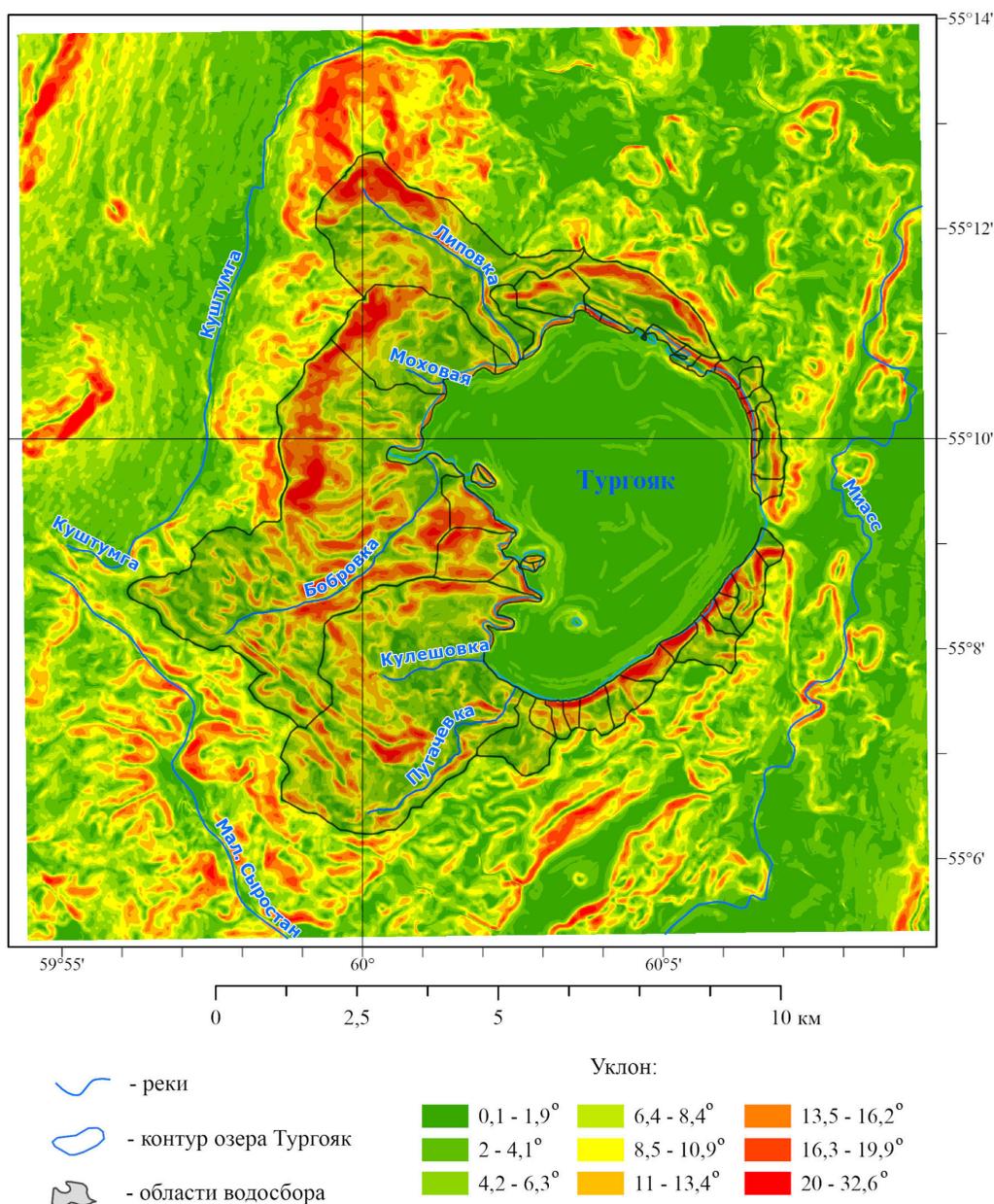


Рис. 6. Уклон цифровой модели рельефа.

Сочетание цифровых моделей дочетвертичных и четвертичных отложений (рис. 2, 3, 7, 8) отчетливо показывает, что дочетвертичные породы перекрываются четвертичными отложениями толщиной от 2 до 100 м (для водосборной территории средневзвешенное значение составляет – 12 м). Несмотря на выход на дневную поверхность дочетвертичных горных пород в виде останцов выветривания, даек и интрузивных контактов (Петров и др., 2015), четвертичные отложения выступают главным поставщиком осадочного материала в озеро, поскольку площадь выходов дочетвертичных горных пород на дневную поверхность очень мала по сравнению с осадочными покровами четвертичных отложений.

Наибольшая площадь водосборной области 17.10 км² соответствует бассейну реки Бобровка, расположенному с западной стороны. Здесь четвертичные отложения (рис. 8) представлены широким спектром осадочных горных пород. Наибольшую площадь 13.61 км² покрывают породы неоплейстоцена. Десерпционные образования

полярноуральского горизонта (drIII_{pu}) толщиной до 15 м распространены на площади 9.28 км². 2.91 км² покрывают делювиальные образования североуральского надгоризонта (dIII_{sv}) толщиной до 6 м, и 1.42 км² аллювиальные образования древних речных долин неоплейстоцена сылвицкого горизонта (αI-II_{sl}) толщиной до 31 м. Образования верхнего неоплейстоцена-голоцена представлены на площади 2.45 км² пролювиальными и делювиальными образованиями (pIII-N и p,dIII-N). Толщина таких отложений может достигать 44 м. Голоценовые отложения здесь развиты слабо (1.04 км²) и представлены аллювиальными образованиями пойменных террас и русел (αHgr) толщиной до 10 м и озерными образованиями (IHgr) толщиной до 2 м. Дочетвертичные образования (рис. 7) на площади 11.85 км² представлены породами Тургоякского гранитоидного массива (γδC₁₋₂ts₁), 4.43 км² сложены кристаллическими сланцами с прослоями углеродистых образований и мраморов уреньгинской свиты (RF₂ur). Площадь 0.76 км² представлена гранитами двуполовошпатовыми

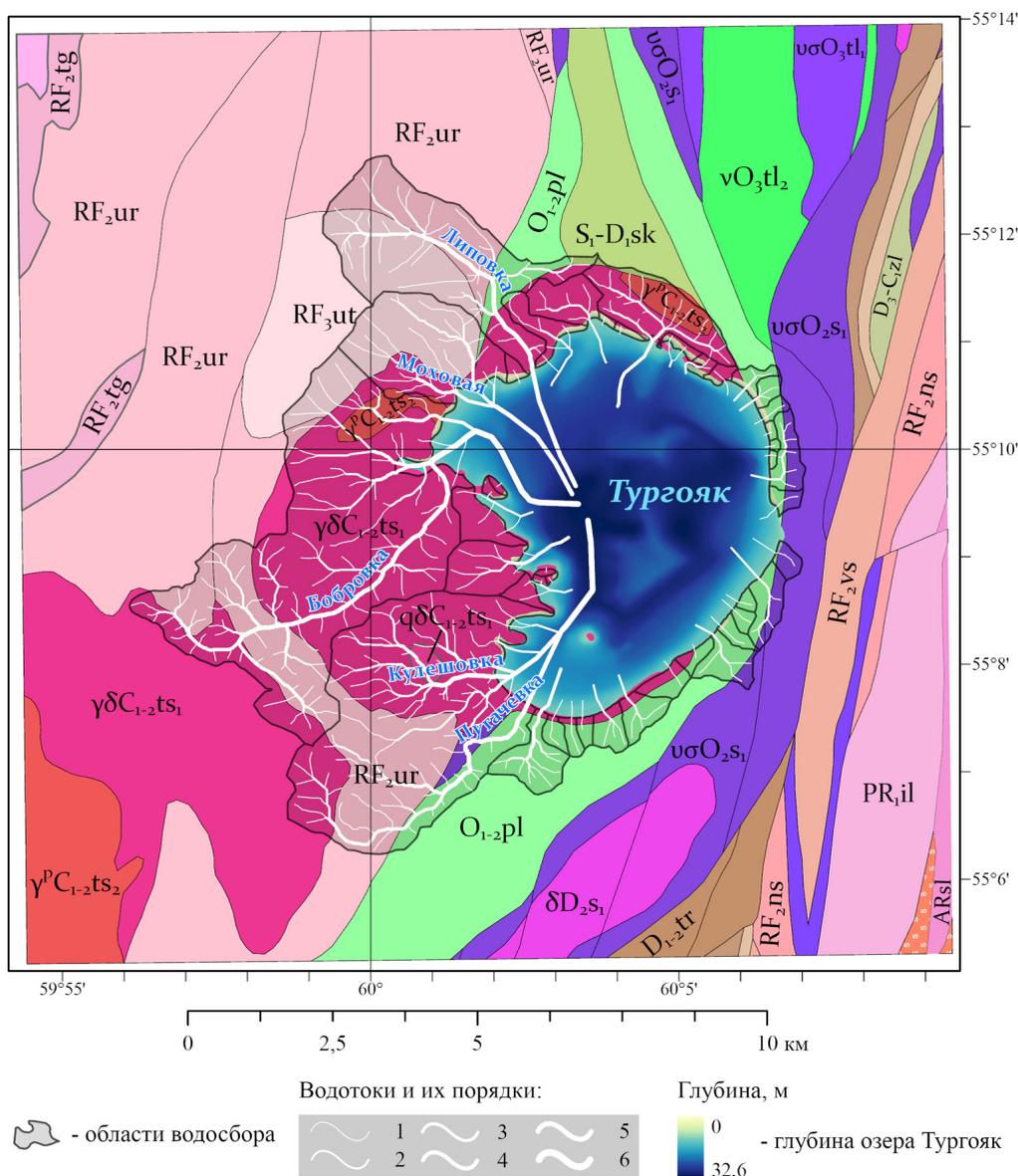


Рис. 7 Совмещенная геолого-гидрологическая модель озерной системы Тургойак на основе геологической карты дочетвертичных образований. Условные обозначения по геологическому строению см. рис. 2.

с преобладанием плагиоклаза Тургойско-сыростанского комплекса диорит-гранодиорит-гранитового ($\gamma^p C_{1-2} ts_2$).

Помимо этого, на западном обрамлении озера насчитывается еще 8 водосборных областей общей площадью 2.08 км² (рис. 8). Наибольшая площадь 1.99 км² представлена породами плейстоцена: 1.75 км² составляют глыбы, щебень и глины песчаные со щебнем полярноуральского горизонта (drIIIpu) толщиной до 15 м, и 0.24 км² – суглинки бурые с дресвой, щебень и редкий гравий местных пород североуральского надгоризонта (dIIIsv) толщиной до 6 м. Озерные образования горбуновского горизонта голоцена (IHgr) развиты на 0.06 км² и представлены песками, алевритами и глинами иловатыми толщиной до 2 м. Дочетвертичные образования (рис. 7) сложены породами Тургойского гранитоидного массива ($\gamma\delta C_{1-2} ts_1$).

Следует отметить, что наибольший уклон рельефа (рис. 6) до 33° наблюдается в области распространения десерпционных образований полярноуральского горизонта, покрывающих Тургойский плутон, и в значительно

меньшей степени в области распространения четвертичных отложений (αI -IIsl, drIIIpu, p,dIII-H, α Hgr), покрывающих кристаллические сланцы уреньгинской свиты.

Площадь водосборной области рек Пугачевка и Кулешовка составляет 12.90 км². Водосбор расположен на юго-западе и охарактеризован породами различных стратиграфических комплексов. На площади 10.21 км² четвертичные отложения (рис. 8) представлены осадочными породами плейстоцена: десерпционные образования полярноуральского горизонта (drIIIpu) толщиной до 15 м развиты на площади 6.12 км², делювиальные образования североуральского надгоризонта (dIIIsv) толщиной до 6 м покрывают 4.09 км². Пролувиальные образования (pIII-H) толщиной от 5 до 10 м занимают 1.59 км². 1.10 км² представлены породами горбуновского горизонта (α Hgr и IHgr толщиной до 2 и 10 м соответственно). На площади 6.95 км² распространены дочетвертичные образования Тургойского массива ($\gamma\delta C_{1-2} ts_1$), 4.05 км² составляют породы уреньгинской свиты (RF₂ur), 1.23 км² представлены основными эффузивами поляковской свиты

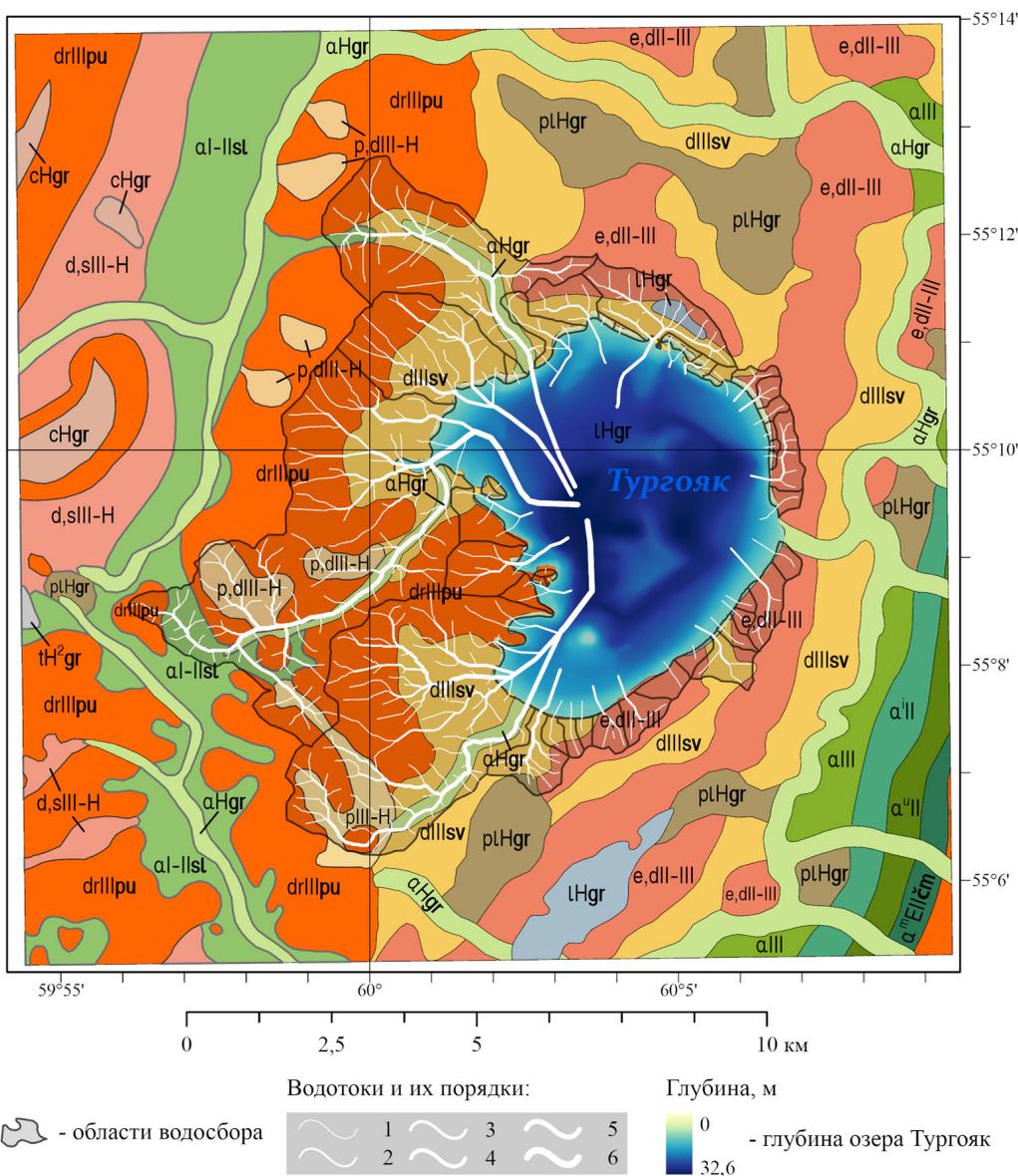


Рис. 8 Совмещенная геолого-гидрологическая модель озерной системы Тургояк на основе геологической карты четвертичных отложений. Условные обозначения по геологическому строению см. рис. 3.

($O_{1-2}pl$) – натриевыми афировыми базальтами, сланцами кремнисто-глинистыми и кремнистыми туффитами, 0.39 км^2 – дунитами, гарцбургитами, верлитами, клинопироксенитами и габбро сакмарского комплекса ($v\sigma C_2s$), 0.28 км^2 – кварцевыми диоритами первой фазы тургоякско-сыростанского комплекса диорит-гранодиорит-гранитового ($q\delta C_{1-2}ts_1$) (рис. 7). В виде узкой полосы, обнажаясь на правом берегу реки Пугачевки, картируются черные углистые сланцы сакмарской свиты (S_1-D_1sk). Породы представлены углисто-кремнистыми, углисто-глинистыми черными сланцами с мелкими включениями фосфоритов, пронизанными сетью прожилков кварцитов. Следует отметить, что в юго-западном направлении наблюдается постепенный спад метаморфизма и в афировых базальтах сохраняется типичная базальтовая структура (Сначев и др., 2020). На территории водосбора отмечается уклон рельефа порядка $2-6^\circ$, достигающий значений 20° в южной части водосборной области (рис. 6).

С северо-западной стороны расположены водосборные области рек Моховая и Липовка. Площади их водосборных

территорий составляют 3.73 км^2 и 6.70 км^2 , соответственно. Водосборная область реки Моховая представлена главным образом отложениями североуральского надгоризонта ($drIIIpu$) и полярноуральского горизонта ($dIIIsv$) плейстоцена. Суглинки бурые с дресвой, щебнем и редким гравием местных пород толщиной до 6 м и глыбы, щебень и глины песчаные со щебнем толщиной до 15 м покрывают кристаллические сланцы уреньгинской свиты (RF_2ur , 2.56 км^2) и породы Тургоякского массива ($\gamma\delta C_{1-2}ts_1$, 1.17 км^2). У берегов озера отмечается наличие озерных образований горбуновского горизонта ($lHgr$, 0.08 км^2). В области развития пород полярноуральского горизонта у границ водораздела отмечается наибольший уклон рельефа, достигающий 33° (рис. 6).

Водосборная область реки Липовка площадью 5.64 км^2 представлена породами плейстоцена. 2.88 км^2 – отложениями североуральского надгоризонта ($drIIIpu$), 2.08 км^2 – полярноуральского горизонта ($dIIIsv$), 0.48 км^2 – элювиально-делювиальными образованиями ($e,dII-III$) толщиной до 2 м и 0.2 км^2 аллювиальными образованиями

древних речных долин сыльвицкого горизонта неоплейстоцена (αI -Psl) толщиной до 31 м. 1.06 км² покрывают аллювиальные образования пойменных террас и русел горбуновского горизонта голоцена (αHgr) толщиной до 10 м. Дочетвертичные отложения представлены на площади 2.74 км² осадочными отложениями уйташской свиты (RF3uš), сложенной слюдястыми кварцитовидными песчаниками, слюдяно-кварцевыми сланцами, филлитами с прослоями слоистых песчаников с магнетитом, гематитом и цирконом. На площади 2.48 км² прослеживаются породы уреньгинской свиты (RF₂ur), 0.79 км² – породы Тургойского гранитоидного массива ($\gamma\delta C_{1-2}ts_1$), 0.69 км² – основные эффузивы поляковской свиты ($O_{1-2}pl$). Водораздел на юге имеет значительный уклон, достигающий значения 33° (рис. 6). Данная область представлена десерпционными образованиями полярноуральского горизонта плейстоцена, покрывающими дочетвертичные образования уреньгинской свиты и в меньшей степени породы уйташской свиты.

На севере расположены 9 водосборных областей общей площадью 3.90 км². На территории, охватывающей 3.30 км², распространены породы плейстоцена. 2.04 км² покрывают делювиальные образования североуральского надгоризонта (dIIIsv), на 1.26 км² лежат элювиально-делювиальные образования (e, dII-III), представленные выветрелым щебнем подстилающих пород с суглинистым заполнителем, дресвой и редкой галькой толщиной до 2 м. Голоценовые отложения главным образом представлены озерными образованиями (IHgr) на площади 0.58 км² и аллювиальными образованиями пойменных террас и русел горбуновского горизонта (αHgr) на площади 0.02 км². Дочетвертичные отложения на площади 3.17 км² представлены породами Тургойского массива ($\gamma\delta C_{1-2}ts_1$), оставшаяся часть приходится на граниты массива второй фазы ($\gamma^p C_{1-2}ts_2$). На побережье базальты превращены в типичные роговообманковые плагиосланцы, состоящие из роговой обманки и плагиоклаза с зернами тонкозернистого магнетита (Сначев и др., 2020). Наибольший уклон рельефа отмечается вдоль северной границы водоразделов и на берегах озера, достигающий 20° (рис. 6).

С восточной стороны насчитывается наибольшее количество водосборных областей. Их общая площадь не велика и составляет 3.21 км². Наибольшая площадь 2.46 км² соответствует элювиально-делювиальным образованиям (e, dII-III) толщиной до 2 м. Меньшую площадь 0.54 км² охватывают делювиальные образования североуральского надгоризонта плейстоцена (dIIIsv). Пески, алевроиты, глины иловатые озерных образований горбуновского горизонта голоцена (IHgr) толщиной до 2 м покрывают 0.21 км². Дочетвертичные образования, представленные породами поляковской свиты ($O_{1-2}pl$) покрывают наибольшую площадь 2.12 км². Нижняя граница толщи тектоническая и проходит по зоне Главного Уральского глубинного разлома. Площадь 1.00 км² картируется породами сакмарского комплекса ($u\sigma O_2s_1$), представленными дунитами, гарцбургитами серпентинизированными, тальково-карбонатными и тальковыми породами, листовниками, 0.09 км² – породами Тургойского массива ($\gamma\delta C_{1-2}ts_1$). В зоне контакта с Тургойским массивом породы поляковской толщи интенсивно амфиболитизированы. Вдоль береговой линии озера в области распространения

пород поляковской свиты отмечается наибольший уклон рельефа, достигающий 33° (рис. 6).

С юга озеро обрамляют 7 водосборных областей общей площадью 2.50 км². Большую часть площади 2.41 км² покрывают элювиально-делювиальные образования (e, dII-III, 1.51 км²) толщиной до 2 м и делювиальные образования североуральского надгоризонта плейстоцена (dIIIsv, 0.90 км²). Палюстринные образования (pIHgr), сложенные глинами иловатыми, торфянистыми, торфом толщиной до 8 м представлены на площади 0.09 км². Дочетвертичные образования на площади 2.20 км² составляют основные эффузивы поляковской свиты ($O_{1-2}pl$), 0.30 км² сложены породами Тургойского массива ($\gamma\delta C_{1-2}ts$). Наибольший уклон (рис. 6) здесь также наблюдается вдоль побережья озера.

Построенная цифровая модель позволяет идентифицировать пелагиаль озера, задаваемую западной и восточной депрессионными зонами. Пелагиаль граничит с литоралью, наименее развитой в восточной части водоема. Максимальная глубина озера на модели составляет 32.6 м, что не противоречит литературным источникам (Захаров, 2020; Андреева, 1973).

На территории восточного склона Южно-Уральских гор чаще всего озерные осадки накапливаются преимущественно в пелагиали на поверхности глинистых кор выветривания или плотных глинах неогена (Петров и др., 2015), что вероятно и для исследуемых озерных осадков согласно (Косарева и др., 2023). Так как озеро является проточным, движение осадочного материала в озерной системе связано с его привнесением и выносом, а также его транспортировкой внутри водоема, обусловленной такими процессами как непосредственно седиментация, диффузия из-за градиентов концентраций вещества, обмен между глубоководными участками и поверхностными водами, разложение органических частиц бактериями, первичная биопродукция, перенос вещества из озерной биосферы в геосферу (Nakanson, 2012).

Состав озерных осадков формируется как за счет аллохтонного материала, так и за счет компонентов водной толщи. К таким основным компонентам относятся растворенные газы, растворенные твердые вещества, взвешенные твердые вещества и взвешенные организмы. Исследования кернов донных отложений озера Тургойск подтверждают их сложный вещественный состав (Масленникова и др., 2018; Косарева и др., 2023).

Всякий раз, когда в верхних слоях воды озера возникают течения, происходит обмен компонентов водной толщи между литоралью и пелагиалью. Химические различия между верхними несколькими метрами пелагиали и литорали могут возникать под влиянием биологических процессов, но при слабых течениях.

Озерные осадки образуются в результате осаждения органического вещества и минералов, поступающих с водоразделов озера, а также органического вещества, состоящего из фекальных комков, органических остатков (детрита) и фрагментов скелетов организмов, полученных из самого озера. Постоянное осаждение этого мелкого смешанного твердого материала происходит по всему озеру. Возмущение осадков движущейся водой происходит преимущественно на мелководье, где большая часть энергии ветровых течений и бегущих волн расходуется

на дно литорали. Таким образом, энергия вблизи берега может привести к переносу тонкозернистых осадков, характерных для озер, в более глубоководные зоны. По этой причине озерные отложения могут накапливаться не во всех частях литорали (Lewis, 2009), что, согласно сейсмоакустическим данным (Косарева и др., 2023), характерно и для озера Тургояк.

Временной разрез сейсмоакустического профиля, пересекающего озеро с юго-запада на восток, показывает, что юго-западный склон озерной чаши более пологий, северо-восточный – крутой (Косарева и др., 2023). При этом заполнение озерной чаши осадками происходит неравномерно, в основном, в пелагиали. Следует отметить, что наибольшая толщина осадков (8 м) выявлена в восточной части озера. Определены различные скорости накопления осадочного материала в разных частях озерной котловины: более глубокая, северо-восточная часть котловины, заполнялась осадками быстрее (Дерягин, 2018). Скорость осадконакопления за последние 100 лет составляет в среднем 1.75 мм/год (Захаров, 2020).

Состав аллохтонного материала, формирующегося на водоразделах, определяется составом пород обрамления озера, включающего и области размыва, и пути транспортировки.

Обрамление озера на *западе* представлено в основном склоновыми россыпями неоплейстоцена, а именно глыбами, щебнем и глинами, в меньшей степени суглинками, щебнем, глинами и песками делювиальных и аллювиальных образований. Суглинки доминируют в пролювиальных и делювиальных образованиях верхнего неоплейстоцена-голоцена, а пески – в аллювиальных образованиях пойменных террас и русел, и озерных образований голоцена.

Юго-западное обрамление озера характеризуется распространением глыб, щебня и глин десерпционных образований, суглинков и щебня делювиальных образований плейстоцена, а также суглинков и песков пролювиальных образований верхнего неоплейстоцена-голоцена. Голоценовые отложения в основном представлены песками.

Северо-западные участки, граничащие с озером, отмечаются преобладанием суглинков, щебня, глыбового и глинистого материала неоплейстоцена, и песками озерных и аллювиальных образований голоцена.

Многочисленные *северные* и *восточные* водосборные области в основном сложены глыбами и щебнем, в меньшей степени глинистым материалом. Голоцен представлен в основном песками озерных образований и аллювиальных образований пойменных террас и русел.

Южные территории водосборных областей представлены элювиально-делювиальными и делювиальными плейстоценовыми образованиями, в основном щебнем и глыбами. Палюстринные голоценовые образования сложены глинами иловатыми и торфом.

Очевидно, что все описанные территории обеспечивают водоем аллохтонным осадочным материалом, образующимся в результате процессов физического, химического и биологического выветривания отложений фаций континентальной группы (элювий, делювий, пролювий, аллювий) и закономерно сложены зрелыми

минеральными компонентами (кварц, полевые шпаты, тальк, роговая обманка, циркон и т.п.).

Следует отметить, что полученная в настоящей работе цифровая модель озерной системы Тургояк соответствует современному уровню построения подобных моделей. Точность ЦМР (30 м) обеспечивается спутниковыми данными Copernicus DEM GLO-30 (Европейское космическое агентство), которые не уступают по точности данным спутников Landsat7 и 8 (агентство NASA), часто используемых при выполнении подобных работ. В то же время необходимо отметить, что данные Copernicus DEM GLO-30 и Landsat7 и 8 уступают в точности данным со спутников, предназначение которых заключается в проведении детальных исследований поверхности земного шара. В качестве примера таких спутников можно назвать аппараты миссии Sentinel-2, расположенные на полярной орбите и предоставляющие снимки с разрешением до 10 м.

Наша цифровая модель выгодно отличается по наполнению от современных аналогов (Masoud et al., 2021; Rongali et al., 2024; Потахин и др., 2024), включая ЦМР, батиметрию озерной котловины, водоразделы, площади водосборов, уклон поверхности и дренажную сеть. Площади водосборов охарактеризованы выходящими на поверхность четвертичными отложениями и дочетвертичными образованиями.

Следует отметить определенные перспективы в развитии и дополнении нашей модели. В международной практике используется подход многолетнего мониторинга, применение которого также возможно при исследованиях акватории озера Тургояк. Дальнейшее совершенствование модели возможно на основе использования геологических карт более крупного масштаба и данных по детальной батиметрии озера. Также есть определенные перспективы в оценке объема поставляемого в озеро осадочного материала при наличии данных водозаборных измерений на реках, а именно данных по средним годовым расходам воды и средним объемам речных наносов.

Полученная модель послужит основой для дальнейших различных исследований озера Тургояк, включая выяснение особенностей донных отложений в связи с морфометрией водоема, источниками сноса и другими факторами и процессами озерного седиментогенеза, а также позволит выполнить реконструкции развития водоема и проследить изменение его морфометрических характеристик в различные климатические периоды прошлого.

Заключение

Впервые для озера Тургояк в среде ГИС построена цифровая модель, демонстрирующая геологические, топографические и гидрологические характеристики выбранного озера и его обрамления. Полученная цифровая модель имеет важное значение для развития представлений о строении и генезисе озерных и других сопряженных фаций на Южном Урале. Создание аналогичных цифровых моделей для озерных систем Урала и других регионов России и мира открывает возможности на новом уровне систематизировать информацию и использовать ее для различных реконструктивных целей.

Финансирование

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности.

Литература

- Андреева М.А. (1973). Озера Среднего и Южного Урала: моногр. Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 270 с.
- Артаев О.Н., Баянов Н.Г. (2015). Морфометрия Мухтоловских озёр. Опыт построения моделей озёрных котловин в ГИС. *Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Сидовича*, 14, с. 199–211.
- Асташин и др. (2016). Морфометрические характеристики озёр Паровое, Кругленькое, Глубокое Государственного природного биологического заказника «Пустынский» (Нижегородская область). *Международный научно-исследовательский журнал*, 8(50), с. 49–54. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.50.177>
- Аулов Б.Н., Владимирцева Ю.А., Гвоздик Н.И., Королькова З.Г., Левин Ф.Д., Липаева А.В., Поташова М.Н., Самозванцев В.А. (2015). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-40-ХII – Златоуст. Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ (Министерство природных ресурсов РФ ФГУНПП «Аэрогеология», ВСЕГЕИ), 365 с.
- Гаврилкина С.В., Кораблева О.Е., Митюхляев Д.В., Рогозин А.Г., Танаева Г.В., Ткачев В.А., Шиманский Л.И. (1998). Экология озера Тургояк. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 154 с.
- Григорьев С.А., Васина Ю.В. (2020). Мегалитический комплекс и поселения Острова Веры. Челябинск: Абрис, 307 с.
- Дерягин В.В. (2018). Стратификация донных отложений у северного и южного побережий озера Тургояк (Южный Урал). *Проблемы географии Урала и сопредельных территорий. Материалы международной научно-практической конференции*. Челябинск: Край Ра, с. 94–100.
- Дьянова О.П., Дерягин В.В. (2010). Литолого-геоморфологические особенности побережий некоторых озер Южного Урала и Зауралья. *Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки*, 2, с. 106–112.
- Захаров С.Г. (2018). Озеро Тургояк — украшение земли уральской. *Уральский следопыт*, 11, с. 16–23.
- Захаров С.Г. (2020). Динамика экологического состояния озера Тургояк. *Известия Русского географического общества*, 152(1), с. 56–65. <https://doi.org/10.31857/S0869607120010085>
- Косарева Л.Р., Нургалиева Н.Г., Нургалиев Д.К., Ли Х.-Ч., Крылов П.С., Кузина Д.М., Антоненко В.В. (2023). Предварительные магнитно-минералогические исследования неоплейстоцен-голоценовых осадков озера Тургояк. *Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки*, 165(4), с. 563–576. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.563-576>
- Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В., Штенберг М.В. (2018). Реконструкция этапов развития озера Тургояк (Южный Урал) в голоцене. *Литосфера*, 18(6), с. 914–927. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927>
- Мишуткина М.Ю., Кагарманова М.У., Рожнова Е.С. (2021). Экспедиция «Тургояк-2021» в сборнике: Географическое пространство: сбалансированное развитие природы и общества. Материалы II Международной научно-практической конференции. Челябинск, с. 110–114.
- Петров В.И., Шалагинов А.Э., Пунегов Б.Н. Горлова Л.И., Забелкина Л.Г., Григорова Т.Б., Никольский В.Ю., Шалагинова Т.И., Петрова А.С., Середя В.В. (2015). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-41-VII. Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, с. 168.
- Потахин М.С., Зобков, М.Б., Беляев, П.Ю. (2024). Новая цифровая батиметрическая модель Онежского озера (Верхне-Сви́рского водохранилища): разработка, верификация, применение. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69(1), с. 85–107. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.105>
- Рогозин А.Г., Такачев В.А. (1998). О некоторых гидрологических особенностях озера Тургояк. *Изв. Челябинского научного центра*, 1, с. 70–75.
- Сначёв А.В., Сначёв В.И., Романовская М.А. (2020). Геология, условия образования и рудоносность Тургоякского гранитного массива и углеродистых отложений его западного обрамления (Южный Урал). *Вестн. Моск. Ун-та.*, 4(1), с. 12–20. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2020-1-12-20>
- Тургояк. Озеро-памятник природы и окрестности. (1993). Ред. Терентьев, М.М., Моисеев, А.П. Челябинск: Рифей, с. 132.
- Ферштатер Г.Б., Шагалов Е.С., Беа Ф., Монтеро П. (2000). Тургоякско-Сыроганская группа гранитоидных массивов зоны Главного Уральского глубинного разлома. *Магматические и метаморфические образования Урала и их металлогения*. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, с. 129–158.
- Шагалов Е.С. (1999). К петрографии и геохимии пород Тургоякского массива (Южный Урал). Ежегодник-1999, ИГиГ УрО РАН. Екатеринбург, с. 129–156.
- ESRI ArcGIS Pro (2024). An overview of the Spatial Analyst. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.0/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-spatial-analyst-toolbox.htm>
- Grigoriev S., Vasina Yu. (2019). The Megaliths of Vera Island in the Southern Urals. *Archaeopress*. <https://doi.org/10.2307/j.ctvndv6h>
- Hakanson L. (2012). Sedimentation Processes in Lakes. In: Bengtsson L, Herschy RW, Fairbridge RW (eds) *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6_3
- Kostruykova A., Mashkova I., Belov S., Shchelkanova E., Trofimenko V., Kargina V. (2022). Assessing relationship of degradation of coastal zones and phytoplankton species structure of Lake Uvildy and Lake Turgoyak (South Ural, Russia) *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/958/1/012002>
- Lewis W.M. (2009). Ecological zonation in lakes – Encyclopedia of Inland Waters. <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00209-X>
- Masoud A.A., El-Horiny M.M., Khairy H.M., El-Sheekh M.M. (2021). Phytoplankton dynamics and renewable energy potential induced by the environmental conditions of Lake Burullus, Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15625-4>
- Menberu Z., Mogesse B., Reddythota D. (2021). Assessment of morphometric changes in Lake Hawassa by using surface and bathymetric maps. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100852>
- Qin Y., Zhang Ch., Lu P. (2023). A fully automatic framework for sub-pixel mapping of thermokarst lakes using Sentinel-2 images. *Science of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100111>
- Rongali G., Tiwari K.C., Vishwas P. (2024). Mapping of Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Flood in Lahul and Spiti District Using Remote Sensing and GIS. In: Biswas B, Ghute BB (eds) *Flood Risk Management*. Springer Natural Hazards. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2688-2_3
- Special Protection Natural Areas of Russia (2024). Lake Turgoyak. <https://oopt.gov74.ru/oopt/overview/oopt/ozeroturgoyak.htm>
- Tarboton DG, Bras RL, Rodriguez-Iturbe I (1991). On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*, 5, pp. 81–100. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>
- The European space agency (2024). DEM – Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM). <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model>
- Zakharov S.G. (2021). Anthropogenic eutrophication of lakes Turgoyak and Bolshoi Kisegach. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012048>

Сведения об авторах

Инна Юрьевна Чернова – кандидат геол.-минерал. наук, доцент кафедры геофизики и геоинформационных технологий Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5 e-mail: inna.chernova@kpfu.ru

Лина Раисовна Косарева – кандидат геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник НИЦ «Цифровая Земля» Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5
e-mail: lina.kosareva@mail.ru

Нурия Гавазовна Нурғалиева – доктор геол.-минерал. наук, профессор кафедры геологии нефти и газа Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5
e-mail: nurgal07@mail.ru

Ольга Сергеевна Чернова – младший научный сотрудник, Научный центр мирового уровня Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты, НИЛ изучения бассейнов нефтегазоаккумуляции Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5
e-mail: OSChernova@kpfu.ru

Статья поступила в редакцию 07.12.2024;
Принята к публикации 30.05.2025;
Опубликована 30.06.2025

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Digital Model of the Turgoyak Lake System, Southern Urals

I.Yu. Chernova, L.R. Kosareva, N.G. Nourgalieva, O.S. Chernova*

Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

**Corresponding author: Lina G. Kosareva, e-mail: lina.kosareva@mail.ru*

Abstract. The sediments of Lake Turgoyak (Southern Urals, Russia) have been accumulating throughout the Late Pleistocene and the Holocene. Sedimentation is controlled by the lake's morphometry, drainage systems, vertical zoning, thermal state of the water, and wind action.

Therefore, analysis of cartographic materials illustrating the area's geology, topography, drainage systems, watersheds (catchment areas) and drainage divides is relevant in this regard. All these aspects are important for assessing the role of sediment sources and transportation routes, as well as deposition mechanisms and sediment distribution within the lake. The study of lake deposits provides valuable insights for genetic interpretation of sedimentary sequences in the context of paleoclimatic and paleoecological trends and events.

This study presents a digital model of Lake Turgoyak and its surroundings. The model was developed using GIS software, incorporating available geological, topographical, and bathymetric maps. Overlaying watershed models onto geological maps of pre-Quaternary and Quaternary deposits enabled assumptions about the material composition of sediment transported into the lake.

Developing similar digital models for lake systems in the Urals, other regions of Russia, and worldwide opens opportunities to systematize information at a new level and utilize it for various reconstructive purposes.

Keywords: lake Turgoyak, Southern Urals, Digital Elevation Model, Geographic Information Systems, hydrology, lake sedimentation

Recommended citation: Chernova I.Yu., Kosareva L.R., Nourgalieva N.G., Chernova O.S. (2025). Digital Model of the Turgoyak Lake System, Southern Urals. *Georesursy = Georesources*, 27(2), pp. 264–280. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.2.20>

Acknowledgments

This work was supported by a subsidy allocated to Kazan Federal University for the implementation of a state assignment (Project No. FZSM-2023-0023) in the field of scientific activity.

References

- Andreeva M.A. (1973). Lakes of the Middle and Southern Urals. Chelyabinsk: Yuzh.-Ural. Publ. (In Russ.)
- Artaev O.N., Bayanov N.G. (2015). Morfometriya Muhtolovskikh ozyor. Opyt postroeniya modelej ozyornyh kotlovin v GIS. Trudy Mordovskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika im. P.G. Smidovicha, (14), pp. 199–211. (In Russ.)
- Astashin A.E., Badin M.M., Kartashov A.Yu., Goryachev A.S., Voznesenskaya M.V., Karabanov A.D., Pashkin M.N. (2016). Morphometric Characteristics of The Lakes Parovoe, Kruglenkoe, Glubokoe Of The State Natural Biological Wildlife Area "Pustynsky" (Nizhny Novgorod Region). *International Research Journal*, 8(50), pp. 49–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.50.177>
- Aulov B.N., Vladimircva Yu.A., Gvozdk N.I., Korolkova Z. G., Levin F. D., Lipaeva A. V., Potashova M. N., Samozvantsev V. A. (2015). State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Second edition. South Ural series. Sheet N-40-XII – Chrysostom. Explanatory note. Moscow: VSEGEI, 365 p. (In Russ.)
- Gavrilkina S.V., Korableva O.E., Mityuhlyayev D.V., Rogozin A.G., Tanaeva G.V., Tkachev V.A., Shimanskij L.I. (1998). Ecology of Lake Turgoyak. Miass: Institute of Geographical Zoology Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. (In Russ.)
- Grigoriev S., Vasina Yu. (2019). The Megaliths of Vera Island in the Southern Urals. *Archaeopress*. <https://doi.org/10.2307/j.ctvndv6hm>
- Grigoriev S.A., Vasina Yu. V. (2020). Megalithic complex and settlements of the Island of Vera. Chelyabinsk: Abris, 307 p. (In Russ.)
- Deryagin V.V. (2018). Stratification of bottom sediments near the northern and southern shores of Lake Turgoyak (Southern Urals). *Proc. Conf.: Problems of the geography of the Urals and adjacent territories*. Chelyabinsk: Krai Ra, pp. 94–100. (In Russ.)
- Diyanova O.P., Deryagin V.V. (2010). Lithologic-geomorphological characteristics of some lakes of South Urals and the Trans-Ural. *Bulletin of the Moscow Region State University. Series Natural Sciences*, (2), pp. 106–112. (In Russ.)

ESRI ArcGIS Pro (2024). An overview of the Spatial Analyst. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.0/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-spatial-analyst-toolbox.htm>

Hakanson L. (2012). Sedimentation Processes in Lakes. In: Bengtsson L, Herschy RW, Fairbridge RW (eds) *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6_3

Kosareva L.R., Nurgalieva N.G., Nurgaliev D.K., Li H, Krylov P.S., Kuzina D.M., Antonenko V.V. (2023). Preliminary Magnetic Mineralogical Studies of the Neopleistocene-Holocene Sediments from Lake Turgoyak. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 165(4), pp. 563–576. (In Russ.) <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.563-576>

Kostryukova A., Mashkova I., Belov S., Shchelkanova E., Trofimenko V., Kargina V. (2022). Assessing relationship of degradation of coastal zones and phytoplankton species structure of Lake Uvildy and Lake Turgoyak (South Ural, Russia) *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/958/1/012002>

Lewis W.M. (2009). Ecological zonation in lakes – Encyclopedia of Inland Waters. <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00209-X>

Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V., Shtenberg M.V. (2018). Reconstruction of Turgoyak lake (the Southern Urals) ecosystem changes in Holocene. *Lithosphere (Russia)*, 18(6), pp. 914–927. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927>

Masoud A.A., El-Horiny M.M., Khairy H.M., El-Sheekh M.M. (2021). Phytoplankton dynamics and renewable energy potential induced by the environmental conditions of Lake Burullus, Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15625-4>

Menberu Z., Mogesse B., Reddythota D. (2021). Assessment of morphometric changes in Lake Hawassa by using surface and bathymetric maps. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100852>

Mishutkina M.Yu., Kagarmanova M.U., Rozhnova E.S. (2021). Expedition “Turgoyak-2021”. *Proc. II International Scientific and Practical Conference: Geographical space: balanced development of nature and society*. Chelyabinsk, pp. 110–114. (In Russ.)

Petrov V.I., Shalaginov A.E., Punegov B.N., Gorlova L. I., Zabelkina L. G., Grigorova T. B., Nikolsky V. Yu., Shalaginova T. I., Petrova A. S., Sereda V. V. (2015). State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Second Edition. South Ural Series. Sheet N-41-VII. Explanatory Note. Moscow: VSEGEI, 168 p. (In Russ.)

Qin Y., Zhang Ch., Lu P. (2023). A fully automatic framework for sub-pixel mapping of thermokarst lakes using Sentinel-2 images. *Science of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100111>

Rogozin A.G., Takachev V.A. (1998). On some hydrological features of Lake Turgoyak. *Izvestiya Chelyabinskogo Nauchnogo Tsentra*, (1), pp. 70–75. (In Russ.)

Rongali G., Tiwari K.C., Vishwas P. (2024). Mapping of Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Flood in Lahul and Spiti District Using Remote Sensing and GIS. In: Biswas B, Ghute BB (eds) *Flood Risk Management*. Springer Natural Hazards. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2688-2_3

Snachev A.V., Snachev V.I., Romanovskaya M.A. (2020). Geology, formation conditions, and ore content of the Turgoyak granite massif and carbonaceous deposits of its western framing (South Ural). *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, (1), pp. 12–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2020-1-12-20>

Special Protection Natural Areas of Russia (2024). Lake Turgoyak. (In Russ.) <https://oopt.gov74.ru/oopt/overview/oopt/ozeroturgoyak.htm>

Tarboton DG, Bras RL, Rodriguez-Iturbe I (1991). On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*, 5, pp. 81–100. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>

The European space agency (2024). DEM – Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM). <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model>

Turgoyak. The lake is a natural monument and its surroundings (1993). Ed. Terentyev M.M., Moiseev A.P. Chelyabinsk: Rifye. (In Russ.)

Fershtater G.B., Shagalov E.S., Bea F., Montero P. (2000). Turgoyak-Syrostan group of granitoid massifs of the Main Ural deep fault zone. Magmatic and metamorphic formations of the Urals and their metallogeny. Ekaterinburg: IGiG UB RAS, pp. 129–158. (In Russ.)

Shagalov E.S. (1999). On the petrography and geochemistry of rocks of the Turgoyak massif (Southern Urals). Yearbook-1999. Ekaterinburg: IGiG UrO RAN, pp. 129–156 (In Russ.)

Zakharov S.G. (2018). Lake Turgoyak — the adornment of the Ural land. *Uralskiy sledopyt*, (11), pp. 16–23. (In Russ.)

Zakharov S.G. (2020). Dynamics of environmental status of the lake Turgoyak. *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 152(1), pp. 56–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869607120010085>

Zakharov S.G. (2021). Anthropogenic eutrophication of lakes Turgoyak and Bolshoi Kisegach. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012048>

About the Authors

Inna Yu. Chernova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor of the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan Federal University
4/5, Kremlevskaya str., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: inna.chernova@kpfu.ru

Lina R. Kosareva – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Scientific and Research Center “Digital Earth”, Kazan Federal University
4/5, Kremlevskaya str., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: lina.kosareva@mail.ru

Nouria G. Nourgalieva – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Department of Oil and Gas Geology, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University
4/5, Kremlevskaya str., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: Nouria.Nourgalieva@kpfu.ru

Olga S. Chernova – Junior Researcher, World-Class Scientific Center Rational Development of Liquid Hydrocarbon Reserves of the Planet, Research Laboratory for the Study of Oil and Gas Accumulation Basins, Kazan Federal University
4/5, Kremlevskaya str., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: OSChernova@kpfu.ru

Manuscript received 7 December 2024;
Accepted 30 May 2025; Published 30 June 2025

© 2025 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)