

О.П. Ермолаев¹, Е.А. Шынбергенов², С.С. Мухарамова³

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «РЕЧНЫЕ БАССЕЙНЫ РОССИИ»

АННОТАЦИЯ

Создана электронная карта бассейновых геосистем малых рек почти на всю материковую часть России. Форма представления — векторный слой полигональных объектов; пространственная детальность соответствует региональному уровню генерализации (м-б 1: 1 000 000). Исследования проводились в три этапа:

- 1) Европейская часть России (за исключением Крыма и Калининградской области);
- 2) Арктический водосбор Азиатской части России;
- 3) Тихоокеанский водосбор (Дальневосточный федеральный округ).

Всего выделено свыше 388 000 объектов (бассейнов) со средней площадью около 47,8 км². Используемая методика построения карты бассейнов включает: выбор базовой ЦМР и карты гидросети; выбор геометрических параметров растровой сетки для представления исходных данных и результатов модельных расчетов; коррекцию ЦМР с использованием карты гидросети; построение границ водосборных бассейнов в автоматическом режиме; оценку точности выделения границ речных бассейнов для разных типов рельефа. Сформирована специализированная геоинформационная система «Бассейны малых рек России». В ГИС интегрирована геоинформация, представляющая природные (геоморфометрия рельефа, гидроклиматические параметры, водный и твердый сток рек, почвы, ландшафты) и антропогенные (типы землепользования, население, транспортная сеть и др.) характеристики бассейнов рек. В качестве примера решения геоэкологических и географических задач представлены расчеты интенсивности эрозии почв для бассейна р. Лены с использованием модифицированной модели смыва почв. Среднее значение эрозионных потерь почвы в бассейне р. Лены с учетом типов земного покрова составляет 0,22 т/га•г. Это свидетельствует в целом об очень низкой интенсивности эрозии, большая часть территории бассейна относится к неопасной категории смыва почв.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водосбор, бассейны малых рек, ЦМР, карты, ГИС

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования, ул. Кремлевская, д. 18, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008,
e-mail: oyermol@gmail.com

² Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Инженерно-технологический институт, ул. Айтеке Би, д. 29А, Кызылорда, Республика Казахстан, 140012,
e-mail: shynbergenov.erlan@mail.ru

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования, ул. Кремлевская, д. 18, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008,
e-mail: smukhara@gmail.com

Oleg P. Yermolaev¹, Yerlan A. Shynbergenov², Svetlana S. Mukharamova³

GEOINFORMATION SYSTEM “RIVER BASINS OF RUSSIA”

ABSTRACT

An electronic map of basin geosystems of small rivers has been created for almost the entire mainland of Russia. The form of representation is a vector layer of polygonal objects; spatial detail corresponds to the regional level of generalization (scale 1: 1 000 000). The research was performed in three stages: 1) The European Part of Russia (with the exception of the Crimea and the Kaliningrad region); 2) The Arctic watershed area of the Asian Part of Russia; 3) The Pacific watershed area (Far Eastern Federal District). In total, over 388 000 objects (basins) have been allocated with an average area of about 47.8 km². The method used for constructing the basin map includes: selection of the base DEM and the hydro grid map; selection of geometric parameters of the raster grid to represent the initial data and the results of model calculations; correction of the DEM using the hydro grid map; construction of watershed basin boundaries in automatic mode; assessment of the accuracy of the allocation of river basin boundaries for different types of terrain. A specialized geoinformation system “Basins of small rivers of Russia” has been formed. GIS integrates geoinformation representing natural (geomorphometry of the relief, the hydro-climatic parameters, sediment yield and river flow, soils, landscapes) and anthropogenic (land use types, population, transport network, etc.) characteristics of river basins. As an example of solving geoecological and geographical problems, calculations of the intensity of soil erosion for the Lena River basin using a modified model of soil loss are presented. The average value of soil erosion losses in the Lena River basin, taking into account the types of land cover, is 0.22 t/ha/year. This generally indicates a very low intensity of erosion, most of the basin area belongs to the non-hazardous category of soil loss.

KEYWORDS: watershed, small river basins, DEM, maps, GIS

ВВЕДЕНИЕ

Географический и геоэкологический анализ обширных территорий, располагающихся в гумидном климате Земли повсеместно расчлененных густой сетью рек, удобнее всего осуществлять на основе бассейнового подхода [Корытный, 2001; Мальцев, Ермолаев, 2014; Осипов, Дмитриев, 2017; Vogt et al., 2003; Golosov et al., 2021; Shvarev et al., 2022]. В настоящий момент на территорию России нет единой геопространственной базы данных или геоинформационной системы (ГИС), привязанной к бассейнам малых рек [Shynbergenov, Sihanova, 2017]. Создание такой ГИС сплошного покрытия и свободного доступа с возможностью накопления больших объемов пространственной информации о природных системах, а также использования современных информационных методов пространственного анализа позволяют сформировать научную базу для принятия управленческих решений в сфере природопользования и охраны окружающей среды [Shynbergenov et al., 2017; Maltsev et al., 2019].

Цель исследования — создание электронной карты бассейнов малых рек России для формирования специализированной геоинформационной системы «Бассейны малых рек

¹ Kazan Federal University, Institute of Environmental Sciences, 18, Kremlyovskaya str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420008, Russia, *e-mail*: oyermol@gmail.com

² Korkyt Ata Kyzylorda University, Engineering and Technology Institute, 29A, Ayteke Bi str., Kyzylorda, 140012, Republic of Kazakhstan, *e-mail*: shynbergenov.erlan@mail.ru

³ Kazan Federal University, Institute of Environmental Sciences, 18, Kremlyovskaya str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420008, Russia, *e-mail*: smukhara@gmail.com

России». Создаваемая карта может служить основой для решения широкого круга задач: установления зависимостей формирования и функционирования малых речных систем от ландшафтно-географических условий территории, тематического картографирования, установления закономерностей стока рек, определения степени антропогенной нагрузки на бассейны и интегральной оценки их геоэкологического состояния.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Создание векторного слоя границ речных бассейнов территории исследования;
2. Разработка структуры базы геоданных;
3. Подбор и получение тематической геоинформации, имеющейся в открытом доступе, о природных и антропогенных условиях территории исследования;
4. Наполнение базы данных ГИС тематической информацией;
5. Построение тематических электронных карт;
6. Решение геоэкологических и географических задач на примере оценки интенсивности природно-антропогенной эрозии почв в бассейне р. Лены.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построение электронной векторной карты речных бассейнов

В наших исследованиях речной бассейн выступает как базовая операционно-территориальная единица (ОТЕ) для проведения пространственного анализа, оценки и моделирования. Разработана методика автоматизированного выделения границ речных бассейнов по глобальным ЦМР [Ермолаев и др., 2014]. Процесс создания модели бассейнов рек (векторного слоя) включал следующие этапы: подбор исходных данных; предварительная обработка модели рельефа; построение границ бассейнов в автоматическом режиме; постобработка — автоматическая и ручная коррекция границ бассейнов.

Выбор исходных данных необходимой детальности, сам ход реализации методики, оценки качества получаемого результата подробно описаны в [Ермолаев и др., 2014; Rodriguez et al., 2005; Ivanov et al., 2016]. Здесь лишь коротко изложим основные моменты. В качестве исходных данных были выбраны модель рельефа GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010) 250-метрового пространственного разрешения [Danielson, Gesch, 2011] и векторная карта водных объектов РФ м-ба 1: 1 000 000. Предварительная обработка включала создание единой мозаики из 9 фрагментов GMTED2010, коррекцию модели рельефа по карте гидрографической сети, устранение локальных «западин», присутствующих в исходной модели [O'Callaghan, Mark, 1984]. Границы бассейнов рек для всей территории исследования выделялись на основе скорректированной модели рельефа и растровой модели гидрографической сети в автоматическом режиме по алгоритму, реализованному в программе WhiteboxGAT¹ [Lindsay, 2014]. Векторная геометрия границ, представленная после автоматического выделения с точностью до линейного размера ячейки растра, корректировалась с помощью процедур сглаживания полилиний. Топологическая согласованность геометрии рек и границ бассейнов в устьях рек («схождение» границы бассейна к конечному узлу полилинии, представляющей реку) дорабатывалась с помощью автоматических процедур и частично (около 5 %) в ручном режиме. Выделение бассейнов проведено планарно, т. е. выделялись не только бассейны малых рек (в принятом масштабе это водотоки первого порядка), но и их межприточные пространства. Верификация результатов показала хорошую точность выделения границ бассейнов в различных морфолого-генетических типах рельефа. Пространственное разрешение файлов точек (растровой сетки) с учетом

¹ Whitebox Geospatial Analysis Tools. Электронный ресурс: <https://whiteboxgeospatial.wordpress.com> (дата обращения 01.02.2023).

принятого в исследовании уровня генерализации, обеспечивающего сомасштабность всех данных, составляет 250 x 250 м.

Формирование геопространственной базы данных и ГИС бассейнов малых рек выполнялось в три этапа: Европейская часть России (без Крыма и Калининградской области); Арктический водосбор Азиатской части России; Тихоокеанский водосбор (Дальневосточный федеральный округ).

Полученный результат построения границ бассейнов представлен в виде векторного слоя полигональных объектов (бассейнов рек и межприточных пространств). Все объекты получили уникальный идентификатор. На территории ЕЧР выделено 53 865 бассейнов (средняя площадь 71 км²); в Азиатской части России (Арктический и Тихоокеанский водосборы) — 334 762 бассейнов (средняя площадь бассейнов 40 км²).

Наполнение базы данных ГИС тематической информацией

Для информационного наполнения создаваемой ГИС выполнен подбор геоинформации из различных источников. Анализировались ее качество, доступность, применимость для решения географо-геоэкологических задач. Большая часть геоданных получена из открытых источников. Часть геоданных была доступна в электронной форме, пригодной для дальнейшей обработки и анализа, часть геоданных потребовала доработки, часть оцифровывалась в ходе исследовательских работ.

Для характеристики почвенно-геологических условий использовалась электронная почвенная карта России, разработанная в Почвенном институте имени В.В. Докучаева и доступная как Единый государственный реестр почвенных ресурсов России¹.

Для описания условий рельефа использовалась цифровая модель рельефа GMTED2010, на основе которой подготовлены растровые слои морфометрических характеристик рельефа исследуемой территории: крутизна, экспозиция, профильная и плановая кривизны, длины линий тока, эрозионный потенциал рельефа, порядок водотоков и другие различные сочетания морфоструктурных и морфоскульптурных характеристик [Burrough, McDonell, 1998].

Учет геологических условий проводился для территории ЕЧР с использованием Государственной геологической карты дочетвертичных отложений м-ба 1: 1 000 000 (31 номенклатурный лист на всю изучаемую территорию за 1974–2011 гг.). В ГИС представлены состав дочетвертичных пород и их возраст.

Для включения в базу геоданных климатической информации были получены и обработаны многолетние данные ежедневных наблюдений температуры воздуха и количества осадков на метеостанциях России и бывшего СССР (ФГБУ «ВНИИГМИ — МЦД»)². Для метеостанций, обеспеченных данными, рассчитывались значения 16-ти климатических показателей:

- 1) средняя годовая температура воздуха;
- 2) средняя температура воздуха в январе;
- 3) средняя температура в июле;
- 4) среднее многолетнее максимумов температуры за год;
- 5) среднее многолетнее минимумов температуры за год;
- 6) среднее многолетнее амплитуды температуры воздуха за год;
- 7) среднее квадратическое отклонение температуры воздуха за год;
- 8) среднее многолетнее число дней с температурой воздуха ниже 8°;

¹ Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Электронный ресурс: <https://egrpr.esoil.ru/content/1DB.html> (дата обращения 01.02.2023).

² ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных» Электронный ресурс: <http://meteo.ru> (дата обращения 01.02.2023).

- 9) повторяемость сильных морозов (-30° и ниже);
- 10) сумма активных температур;
- 11) среднее годовое количества осадков;
- 12) среднее количество осадков в мае-августе;
- 13) среднее количество осадков за холодный период года;
- 14) среднее количество осадков за теплый период года;
- 15) коэффициент вариации годового количества осадков;
- 16) гидротермический коэффициент.

Из 1124 метеостанций, информация о местоположении которых доступна на <http://meteo.ru/>, данными ежедневных наблюдений за температурой воздуха и осадками обеспечены 600 станций. Обработка проводилась за период с 1960 по 2014 гг., после чего выполнялась пространственная интерполяция каждого из показателей на всю территорию исследования (метод Multilevel B-spline Approximation). Пространственная детальность полученных растровых слоев климатических показателей — 1 км. Кроме этого, в состав ГИС включены климатические слои (bioclimaticvariables) международной общедоступной базы данных WorldClim¹.

В рамках наполнения базы геоданных тематической информацией в ее состав была включена электронная ландшафтная карта, размещенная на сайте ИААСА². Это цифровая версия Ландшафтной карты СССР м-ба 1: 2 500 000 под ред. И.С. Гудилина [Ландшафтная карта..., 1980]. Было проведено уточнение геопривязки этой карты, подобраны параметры проекции, обеспечивающие ее пространственное совмещение с остальной геоинформацией.

Кроме того, привлекались современные мировые и российские источники данных по типам земного покрова и типам землепользования, полученные по материалам космосъемки различного пространственного разрешения в рамках различных исследовательских программ. В результате в ГИС был включен растровый слой типов земного покрова (карта наземных экосистем TerraNorte RLC), разработанный в ИКИ РАН на основе анализа данных спутниковых наблюдений [Барталев и др., 2012]. На карте представлены основные типы растительного покрова:

- 1) лиственные леса;
- 2) смешанные леса;
- 3) смешанные леса с преобладанием лиственных;
- 4) смешанные леса с преобладанием хвойных;
- 5) темнохвойные леса;
- 6) светлохвойные вечнозеленые леса;
- 7) хвойные листопадные леса;
- 8) редины хвойные листопадные;
- 9) лиственные кустарники;
- 10) хвойные вечнозеленые кустарники;
- 11) кустарничковая растительность;
- 12) болота;
- 13) луга;
- 14) степи;
- 15) прибрежная растительность;

¹ Global climate and weather data. Электронный ресурс: <https://www.worldclim.org/data/index.html> (дата обращения 01.02.2023).

² Леса и лесное хозяйство России. Ландшафты. Электронный ресурс: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/russian/for_cond_ru.html#landscapes (дата обращения 01.02.2023).

- 16) травянистая растительность;
- 17) кустарниковая тундра;
- 18) открытые грунты;
- 19) выходы горных пород;
- 20) урбанизированные территории;
- 21) регулярно возделываемые пахотные земли.

После завершения ввода и интеграции в ГИС всей запланированной тематической информации (геология, рельеф, климат, почвенный покров, ландшафты, растительный покров) выполнялось ее обобщение на операционно-территориальные единицы анализа — бассейны. Для каждого из 388 627 бассейнов были определены преобладающие тип почвы и тип почвообразующей породы, класс дочетвертичных отложений, гидроклиматические характеристики, тип и подтип ландшафта; рассчитаны значения площади бассейна, проценты площади бассейна, занятой лесом, лугом, кустарниками, болотами, пашней. Геообработка выполнялась с помощью разработанных SQL-запросов в СУБД PostgreSQL/PostGIS и с помощью программ, написанных на языке R (пакеты `rgdal`, `raster`)¹.

База гидрологических данных, созданная в ходе исследований, включает информацию по речному стоку, полученную на гидрологических постах, ведущих наблюдения за стоком воды и/или стоком наносов на реках Европейской части России. Информационное наполнение базы проводилось по двум направлениям: пространственная (координатная) привязка гидропостов и ввод значений основных характеристик гидропостов и наблюдаемых на них показателей за период действия. В базу введены значения среднегодовых расходов воды и расходов взвешенных наносов, зафиксированных на постах за весь период наблюдений. Они получены из разных источников: опубликованные материалы долгосрочных режимных наблюдений на гидрологических постах [Ресурсы..., 1970], открытые источники Лаборатории Каспийского моря Института водных проблем АН РФ², Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) Федерального агентства водных ресурсов³ и др. Для пространственной привязки гидрологических постов использовались сведения об их местоположении с сайта «ВНИИГМИ — МЦД»⁴. Координатная привязка гидропостов уточнялась с использованием векторных слоев водных объектов м-ба 1: 1 000 000, слоев общегеографического содержания различных масштабов, крупномасштабных топографических карт, детальных космических снимков на «GoogleMaps»⁵ и «Яндекс.Карты»⁶ на основе информации о названиях реки и пункта наблюдений, о расстояниях от истока или устья до поста. Создание точечных объектов слоя гидропостов проводилась с соблюдением топологических отношений с объектами слоев гидросети м-ба 1: 1 000 000 (геометрическое совмещение точки гидропоста с вершиной полилинии для линейного объекта гидросети или с вершиной «скелетона» полигона, представляющего площадной объект гидросети). Был создан

¹ PostgreSQL. Электронный ресурс: <https://www.postgresql.org/> (дата обращения 01.02.2023).

² Лаборатория Каспийского моря Института водных проблем АН РФ. Электронный ресурс: <http://caspi.ru/> (дата обращения 01.02.2023).

³ Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) Федерального агентства водных ресурсов. Электронный ресурс: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 01.02.2023).

⁴ ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» Предоставление гидрологических данных по рекам и каналам. Электронный ресурс: <http://meteo.ru/services-and-products/131-hydro-data> (дата обращения 01.02.2023)

⁵ GoogleMaps. Электронный ресурс: <https://www.google.ru/maps/@70.4755573,125.6007906,8.5z> (дата обращения 01.02.2023).

⁶ Яндекс.Карты. Электронный ресурс: https://yandex.ru/maps/geo/posyolok_kyusuyur/53067496/?ll=127.307399%2C70.700643&z=13.56 (дата обращения 01.02.2023).

слой бассейнов, привязанных к гидропостам. В них также определены значения всех выше указанных параметров. Проведенная верификация ряда консервативных параметров (площади водосборов, средняя высота и др.) с данными из государственного водного кадастра дала хорошую сходимость этих показателей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная карта малых речных бассейнов и созданная для них база данных, реализованные в рамках ГИС «Речные бассейны России», позволяют изучать особенности формирования и функционирования бассейновых геосистем в разнообразных ландшафтно-географических условиях территории исследования, проводить тематическое и комплексное картографирование бассейнов по природным и антропогенным характеристикам, оценивать их современное геоэкологическое состояние (рис. 1). В частности, был создан и размещен в сети Интернет геопортал «Речные бассейны Европейской части России»¹. На геопортале опубликована геоинформация, полученная по результатам исследований и интегрированная в ГИС-проекта. Базовый слой «Бассейны» включает более 53000 объектов — картографических моделей бассейнов малых рек и межприточных пространств с информацией о характеристиках рельефа, почвенно-геологических и климатических условиях, подтипа ландшафтов, лесистости, распаханности, залуженности, заболоченности бассейнов, стоке рек, а также антропогенной нагрузке в бассейнах. На геопортале представлены тематические карты, отображающие пространственное распределение природно-антропогенных характеристик бассейнов на исследуемой территории. Слой «Гидропосты» представляет местоположения около 2000 гидрологических постов, обеспеченных данными о стоке воды и/или стоке наносов на реках Европейской России. К ресурсу предоставлен публичный (открытый) доступ. Для каждого бассейна с использованием методов геостатистического анализа определены значения эрозионности дождей за период 1991–2019 гг., а по ДДЗЗ — фактор растительности как для пашни, так и в пределах лесопокрываемых и закустаренных (залуженных) территорий. Эти данные позволили впервые для ЕЧР определить интенсивность эрозии почв от талого и дождевого стока в бассейнах малых рек.

Решение геоэкологических и географических задач на примере оценки интенсивности эрозии почв в бассейне р. Лены

В качестве примера представлены возможности использования созданной ГИС по малым рекам России для решения геоэкологических задач. Продемонстрировано это на примере бассейна р. Лены.

Река Лена по площади своего бассейна входит в десятку крупнейших рек Земли. В водосборе р. Лены выделено 52 383 бассейна со средней площадью около 47 км². Обзор и визуальное дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли показывает, что территория сельскохозяйственного освоения на юге Восточной Сибири [Голубев, 2009; Рыжов, 2009] в настоящее время ушла значительно севернее, вплоть до места впадения р. Алдана в р. Лену (рис. 2). В этой связи одной из задач исследования, геоэкологической по своему содержанию, явилось определение фундаментальных закономерностей процесса эрозии почв с оценкой интенсивности их смыва в результате талого и дождевого стока и пространственных закономерностей развития эрозии на ранее не изученной в этом аспекте территории страны. Сформированная геоинформационная база данных легла в основу расчета эрозии почвы в бассейне р. Лены. Оценка интенсивности эрозионных потерь почвы за период ливневого поверхностного стока выполнялась на базе модели, даваемой

¹ Речные бассейны Европейской части России. Электронный ресурс: <http://bassepr.kpfu.ru/> (дата обращения 01.02.2023).

универсальным уравнением потерь почвы (USLE/RUSLE), где смыв почвы (т/га• г.) определяется как композиция факторов эрозии: R-фактор осадков (эрозионный потенциал дождевых осадков, ЭПО); K-фактор эродуемости (смываемости) почвы; LS-фактор рельефа; С-фактор растительности (хозяйственно-агрономический); Р-фактор эффективности противоэрозионных мер (нами не учитывался). Для оценки эрозионных потерь почвы от стока талых вод применялась методика НИЛЭПиРП МГУ [Ларионов, 1993] (значительно модифицированная методика ГГИ), где в качестве факторов задействованы характеристики рельефа (длина склона, уклон склона и экспозиции склона), K-фактор эродуемости почвы, С-фактор растительности в период снеготаяния и слой поверхностного склонового стока во время снеготаяния. Общая схема проведения модельных расчетов включала: расчет факторов почвенной эрозии, входящих в модель смыва от стока дождевых осадков и талых вод (ЭПР, ЭПО, запасы воды в снеге, смываемость почвы, хозяйственно-агрономический фактор); расчет эрозии почвы от стока дождевых осадков и талых вод; расчет годовой интенсивности почвенной эрозии как суммы интенсивностей смыва при талом и дождевом стоке.

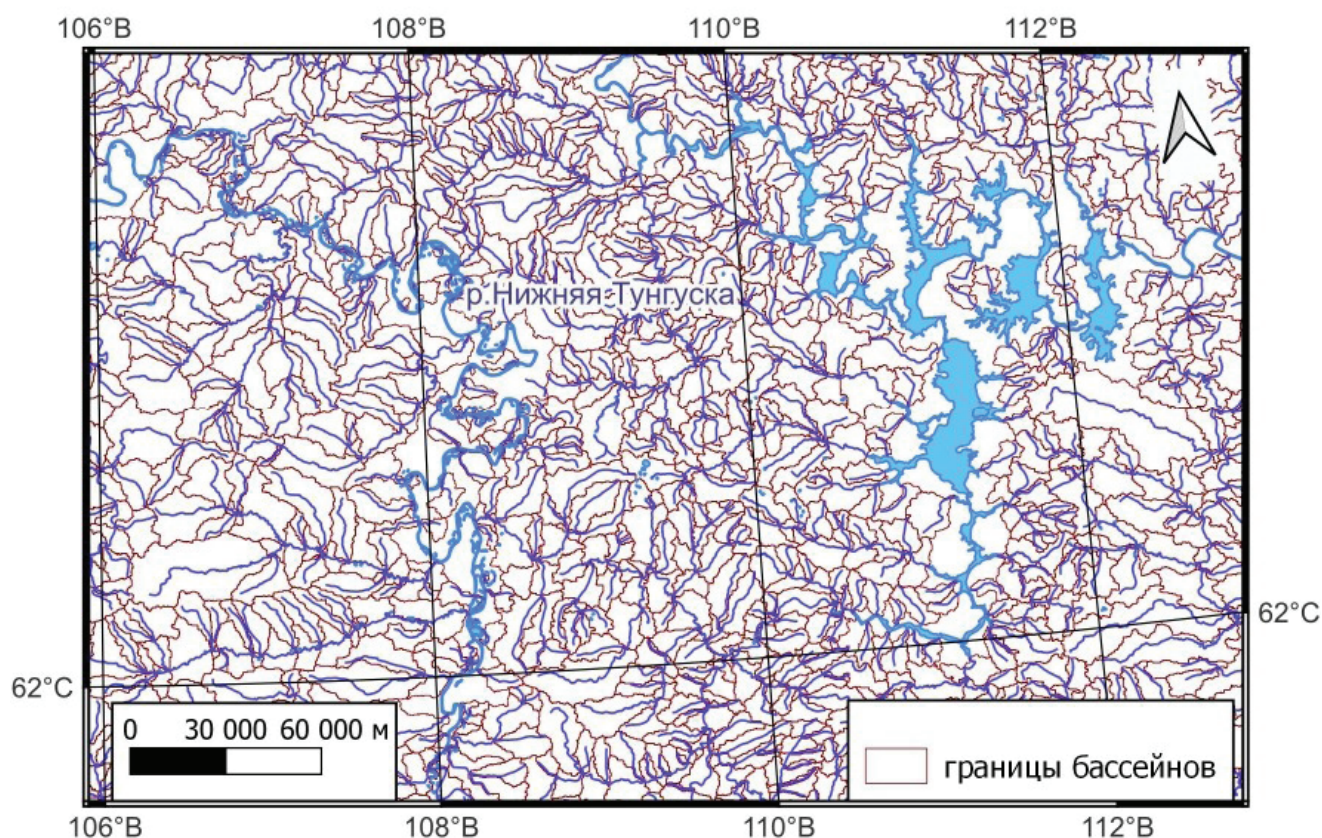


Рис. 1. Карта бассейнов малых рек России (фрагмент)
Fig. 1. Map of small river basins in Russia (fragment)

Оценка эрозии почв не проводилась в пределах территорий, где фактически почвенный покров отсутствует (скальные участки, водно-болотные пространства, урбанизированные территории). Для части почвенных контуров (с торфяными болотными, пойменными, глеевыми типами почв) с учетом их местоположения на склонах значение фактора эродуемости также принималось равным нулю, поскольку в дальнейшем при расчете эрозии почв эти участки были исключены из обработки вследствие фактического

отсутствия здесь эрозии. Для более точного определения такого рода территорий дополнительно проведено картографирование пойменных участков в соответствии с выбранным уровнем генерализации. Картографирование осуществлено с помощью визуального дешифрирования космических снимков высокого разрешения из открытых источников (Google Earth, SAS.Планета). Затем все эти участки были векторизованы и забланкованы [Shynbergenov, Sihanova, 2017].

Среднее значение суммарных потерь почвы (годовой смыв от талого и ливневого стока) без учета типов земного покрова по бассейну р. Лены достаточно высокое и составило 42,3 т/га•г. Отметим, что эти значения соответствуют максимально возможному сценарию развития эрозии при вероятностном полном сведении луговой и древесной растительности, т. е. для т. наз. условий чистого пара (табл. 1).

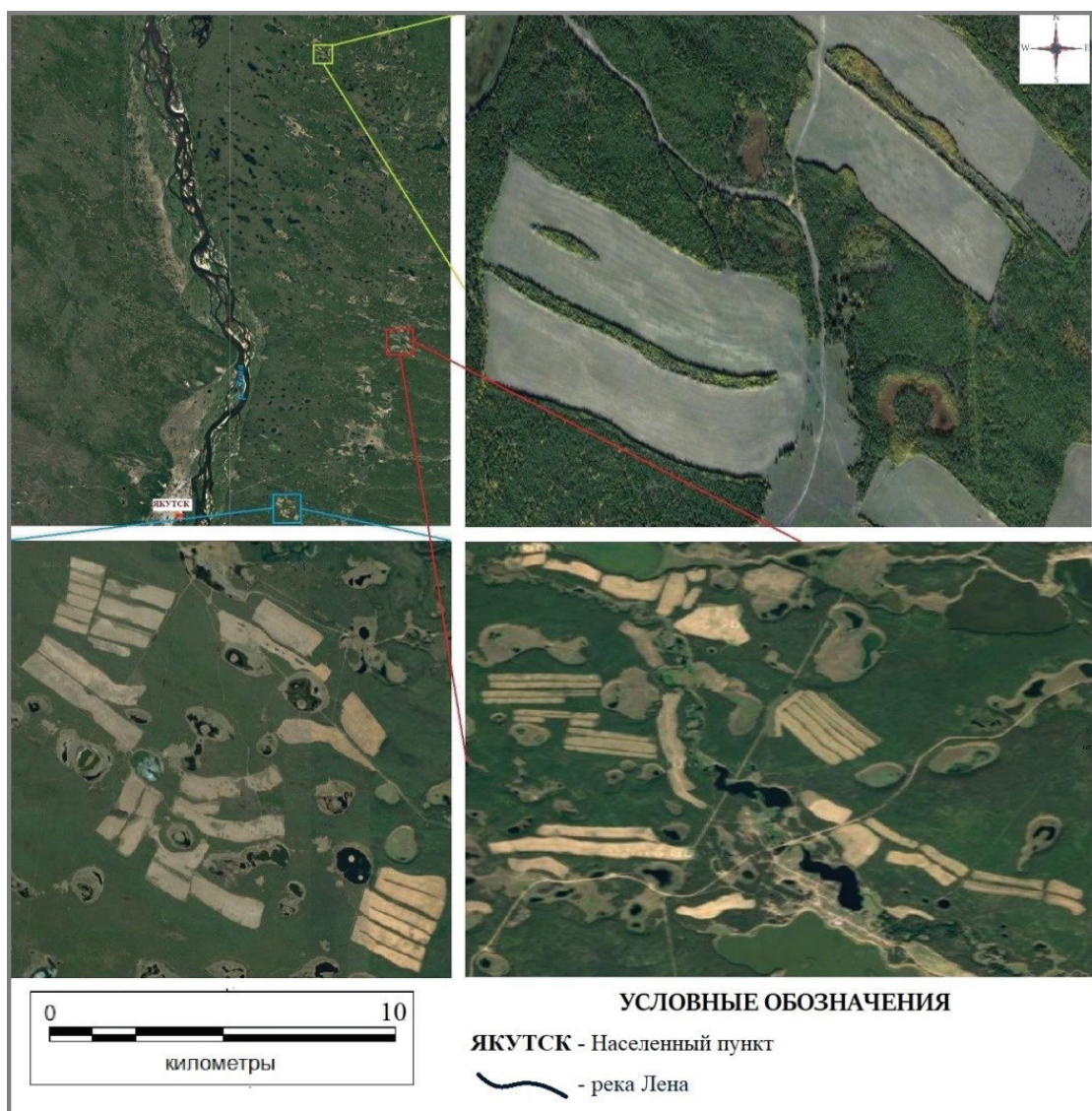


Рис. 2. Пахотные угодья в бассейне р. Лены, расположенные возле г. Якутска (снимки из ГИС SAS.Planet 160707)¹

Fig. 2. Croplands in the river basin. Lena, located near the city of Yakutsk (images from GIS SAS.Planet 160707)

¹ SAS.Планета. Электронный ресурс: <http://www.sasgis.org/sasplaneta/> (дата обращения 01.02.2023)

Табл. 1. Распределение бассейна р. Лены по градациям потенциального смыва почвы
Table 1. Distribution of the river basin Lena according to gradations of potential soil loss

Интенсивность эрозии, т/га• г.	Площади, занимаемые категорией смыва, без учета типов земного покрова		Площади, занимаемые категорией смыва, с учетом типов земного покрова	
	км ²	Доля от общей площади бассейна, %	км ²	Доля от общей площади бассейна, %
0–0,01	1 032 379,8	45	1 055 944,8	49,2
0,01–0,5	4 588,4	0,2	856 832,9	40,1
0,5–2,5	91 767,1	4	198 567,7	9,3
2,5–5	105 532,2	4,6	22 750,8	1,1
5–10	149 121,5	6,5	5 854,3	0,3
10–50	410 657,7	17,9	888,4	0 (0,04)
> 50	500 130,6	21,8	45,1	0 (0,0023)
Всего	2 294 177,3	100	2 140 884	100

Результаты показывают, что более 21 % территории находятся в зоне высокой эрозионной опасности (> 50 т/га). С целью приведения результатов расчета смыва почв к реальной картине проведена дополнительная калибровка факторов модели с применением карты типов земного покрова (Landcover). Она учитывает через поправочный коэффициент зависимость смыва почв от типов растительности. Результаты этих расчетов показывают, что среднее значение годовых потерь почвы на территории исследования уменьшилось на несколько порядков и составляет 0,04 т/га. Почти 99 % территории бассейна относится к неопасной и слабо опасной категории почвенной эрозии. Ничтожные значения эрозии обусловлены высокой долей лесистости и низменным характером рельефа левобережной части бассейна. Очень значительная интенсивность эрозии почв наблюдается менее чем на 0,05 % территории бассейна. На карте эрозии почвы в бассейне р. Лены ареалы максимально возможного смыва расположены по правому склону долины. Это участки возвышенного рельефа (Лено-Ангарское плато, Становое нагорье, Патомское нагорье, Становой хребет, Алданское нагорье, Верхоянский хребет). Здесь встречаются ареалы с высокими показателями смыва почвы (> 50 т/га• г.). В пределах левобережной части долины с низменным рельефом (Приленское плато, Центрально-Якутская равнина, понижения Среднесибирского плоскогорья, Северо-Сибирская низменность) преобладает смыв до 0,5 т/га• г. В бассейне р. Алдана (Становой хребет, Алданское нагорье), вследствие общего возвышенного характера рельефа и, соответственно, больших значений его эрозионного потенциала, смыв почв по правому склону доходит до 50 т/га• г. Далее по левому склону, где начинается Приленское плато, смыв почвы уменьшается, а максимальные значения не превышают 10 т/га• г. Ниже по течению Алдана, после впадения р. Ханды, преобладает низменный рельеф, что отражается на величинах смыва — в основном до 0,5 т/га• г. Совершенно иная морфометрия рельефа, соответствующая горным условиям, наблюдается в бассейнах притоков рр. Витима и Олекмы. Здесь, благодаря горному рельефу, смыв может достигать до 100 т/га• г., с фоновым значением 2,5–5 т/га• г. Бассейн р. Вилюя располагается в слаборасчлененном равнинном рельефе. В среднем течении он возвышенный, а в нижнем — низменный. Здесь значения смыва почв редко превышают 10 т/га• г., доминирует смыв не более 0,5 т/га• г.

ВЫВОДЫ

Фундаментальным вопросом при проведении геопространственного анализа на любом масштабном уровне остается выбор ОТЕ. Наша страна расчленена большим количеством рек. Бассейны рек являются геосистемными образованиями, а также наиболее репрезентативной и удобной ОТЕ за счет четко выраженных границ бассейнов, вещественно-энергетических потоков и иерархичности, позволяющей обоснованно переходить на разный уровень генерализации. Реализация бассейнового подхода проведена в представленном исследовании для территории материковой части России. Разработанной методикой автоматизированного ГИС-картографирования впервые создана электронная карта границ бассейновых геосистем малых рек. Общее количество бассейнов превышает 388 000. Сформирована специализированная геоинформационная система «Речные бассейны России». В состав ГИС вошло более 40 векторных и растровых картографических слоев. В сети Интернет для макрорегиона страны, в котором проживает большая часть населения, создан геопортал открытого доступа «Речные бассейны Европейской части России»¹. Разработанный веб-ресурс также не имеет аналогов в нашей стране и ближнем зарубежье с точки зрения полноты и многообразия геоинформации, отнесенной к естественным геосистемным образованиям — бассейнам рек. Геопорталом за время его работы уже воспользовалось около 10 000 человек из 10 стран мира. По отзывам пользователей интерес представляет не только сама карта бассейнов и привязанная к ним геопространственная база данных, но и картографические представления полученных результатов исследований. В частности, это карта антропогенных нагрузок на бассейновые геосистемы, оценка фактора растительности для различного типа земель и эрозионного потенциала осадков за период 1991–2019 гг. Кроме того, на геопортале размещены результаты исследований по интенсивности эрозии почв, являющейся на пахотных землях основным фактором деградации и снижения плодородия почвенного покрова. Цифровая карта речных бассейнов дает в руки исследователей удобную и репрезентативную основу, геосистемную по своей сути, для пространственных оценок территорий различного масштабного уровня. Небольшие размеры бассейнов, соответствующие второму-третьему порядку, позволяют проводить пространственный анализ с использованием разных операционно-территориальных единиц. При необходимости это могут быть административные единицы разного масштабного уровня: муниципалитеты, области и федеральные округа. При геосистемном подходе территорию можно конструировать, начиная от «элементарного» бассейна до бассейнов крупных и Великих рек, либо интегрировать сетку бассейнов в ландшафтные зоны и районы. Реализация такого подхода с решением задачи по оценке интенсивности эрозии почв показана на примере бассейна Великой реки России — р. Лены.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-17-00025; <https://rscf.ru/project/22-17-00025/>; дата обращения 01 февраля 2023 г.).

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the Russian Science Foundation (grant No. 22-17-00025, <https://rscf.ru/project/22-17-00025/>; accessed 01 February 2023).

¹ Речные бассейны Европейской части России. Электронный ресурс: <http://bassepr.kpfu.ru/> (дата обращения 01.02.2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.
- Голубев И.А.* Проблема определения интенсивности водной эрозии почв в Сибири. Вестник КрасГАУ. Землеустройство, кадастр и мониторинг, 2009. № 1. С. 80–83.
- Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Иванов М.А.* Автоматизированное построение границ бассейновых геосистем для Приволжского федерального округа. География и природные ресурсы, 2014. № 3. С. 32–39.
- Корытный Л.М.* Бассейновая концепция в природопользовании: монография. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2001. 163 с.
- Ландшафтная карта СССР. Масштаб 1: 2 500 000. М.: Министерство геологии СССР, Гидроспецгеология, 1980.
- Ларионов Г.А.* Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Издательство Московского университета, 1993. 200 с.
- Ларионов Г.А., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф.* Методические указания по составлению крупномасштабных карт эрозионноопасных земель для обоснования почвозащитных мер при внутрихозяйственном землеустройстве. М.: Фонды Росземпроекта, 1996. 47 с.
- Осипов Г.К., Дмитриев В.В.* Бассейново-ландшафтный подход к территориальному планированию. Информационная и космос, 2017. № 3. С. 112–117.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Мурманское управление гидрометеорол. службы. Гос. гидролог. ин-т. Ленинград: Гидрометеоздат, 1970. Т. 1. 316 с.
- Рыжов Ю.В.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в бассейнах малых рек юга Восточной Сибири. География и природные ресурсы, 2009. № 3. С. 94–101.
- Bosco C., de Rigo D., Dewitte O., Poesen J., Panagos P.* Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2015. V. 15. No. 2. P. 225–245.
- Burrough P.A., McDonell R.A.* Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press, 1998. 190 p.
- Danielson J.J., Gesch D.B.* Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). Open-File Report 2011–1073. Reston: U.S. Geol. Survey, 2011. 26 p.
- Goloso V.N., Ivanov M.M., Tsyplov A.S., Ivanov M.A., Wakiyama Y., Konoplev A.V., Konstantinov E.A., Ivanova N.N.* Erosion as a factor of transformation of soil radioactive contamination in the Basin of the Shchekino Reservoir (Tula Region). Eurasian Soil Science, 2021. V. 54 (2). P. 291–303. DOI:10.1134/S106422932102006X.
- Ivanov M.A., Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Shynbergenov Y.A.* Geomorphometric analysis of river basins in East European Russia using SRTM and ASTER GDEM data. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016. V. 11. No. 14. P. 3080–3087.
- Lindsay J. B.* The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS. Proceedings of the GIS Research, UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow, UK, 2014. P. 16–18.
- Maltsev K.A., Ivanov M.A., Sharifullin A.G., Goloso V.N.* Changes in the rate of soil loss in river basins within the Southern Part of European Russia. Eurasian Soil Science, 2019. No. 52 (6). P. 718–727. DOI: 10.1134/S1064229319060097.

O'Callaghan J., Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Comput. Vis. Graph. Image Process*, 1984. No. 28 (3). P. 323–344.

Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*. Elsevier Ltd, 2015. No. 54. August. P. 438–447.

Rodriguez E., Morris C.S., Belz J., Chapin E., Martin J., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143 p.

Shvarev S.V., Golosov V.N., Lebedeva E.V., Likhacheva E.A., Kharchenko S.V. Current geomorphology: Natural risk assessment and environmental and anthropogenic interaction. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2022. V. 92 (3). P. 361–369. DOI: 10.1134/S1019331622030145.

Shynbergenov Y.A., Maltsev K., Sihanova N. GIS-technologies application for calculation of potential soil loss of Marha River basin (Republic of Saha). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 2017. V. 107 (1): 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012023.

Shynbergenov Y.A., Sihanova N.S. Identification of Large Rivers of Siberia (Ob, Yenisei, Lena) by using GIS technology based on remote sensing of Earth from Cosmos. *Astra Salvensis*, 2017. V. 5. No. 10. Supplement 1. P. 541–545.

Vogt J.V., Colombo R., Bertolo F. Deriving drainage networks and watershed boundaries. A new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. *Geomorphology*, 2003. No. 53. P. 281–298.

REFERENCES

Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Lupian E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V. Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2012. V. 9. No. 2. P. 9–27 (in Russian).

Bosco C., de Rigo D., Dewitte O., Poesen J., Panagos P. Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015. V. 15. No. 2. P. 225–245.

Burrough P.A., McDonell R.A. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York, 1998. 190 p.

Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). Open-File Report 2011–1073. Reston: U.S. Geol. Survey, 2011. 26 p.

Golosov V.N., Ivanov M.M., Tsyplenkov A.S., Ivanov M.A., Wakiyama Y., Konoplev A.V., Konstantinov E.A., Ivanova N.N. Erosion as a factor of transformation of soil radioactive contamination in the Basin of the Shchekino Reservoir (Tula Region). *Eurasian Soil Science*, 2021. V. 54 (2). P. 291–303. DOI:10.1134/S106422932102006X.

Golubev I.A. The issue of the Siberian water soil erosion intensity determination. *The Bulletin of KrasGAU. Land management, cadastre and land monitoring*, 2009. No. 1. P. 80–83 (in Russian).

Ivanov M.A., Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Shynbergenov Y.A. Geomorphometric analysis of river basins in East European Russia using SRTM and ASTER GDEM data. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016. V. 11. No. 14. P. 3080–3087.

Korytny L.M. Basin concept in nature management: monograph. Irkutsk: Publishing House of IG SB RAS, 2001. 163 p. (in Russian).

Landscape map of USSR. Scale: 1: 2 500 000. Moscow: Ministry of Geology of the USSR, Gidrospetsgeologiya, 1987 (in Russian).

Larionov G.A. Erosion and deflation of soils: basic patterns and quantitative estimates. Moscow: Moscow University Press, 1993. 200 p. (in Russian).

Larionov G.A., Krasnov S.F., Litvin L.F. Methodological guidelines for compiling large-scale maps of erosion-prone lands to substantiate soil protection measures in on-farm land management. Moscow: Roszemproekt funds, 1996. 47 p. (in Russian).

Lindsay J. B. The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS. Proceedings of the GIS Research, UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow, UK, 2014. P. 16–18.

Maltsev K.A., Ivanov M.A., Sharifullin A.G., Golosov V.N. Changes in the rate of soil loss in river basins within the Southern Part of European Russia. *Eurasian Soil Science*, 2019. No. 52 (6). P. 718–727. DOI: 10.1134/S1064229319060097.

Osipov G.K., Dmitriev V.V. Basin-landscape approach to territorial planning. *Information and Space*, 2017. No. 3. P. 112–117 (in Russian).

Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*. Elsevier Ltd, 2015. No. 54. August. P. 438–447.

Rodriguez E., Morris C.S., Belz J., Chapin E., Martin J., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143 p.

Ryzhov Yu.V. Erosion-accumulative processes in the basins of small rivers in the south of Eastern Siberia. *Geography and Natural Resources*, 2009. No. 3. P. 94–101 (in Russian).

Surface water resources of the USSR. V. 1. Murmansk Department of Hydrometeorological Service. State Hydrological Institute. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970. 316 p. (in Russian).

O'Callaghan J., Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Comput. Vis. Graph. Image Process*, 1984. No. 28 (3). P. 323–344.

Shvarev S.V., Golosov V.N., Lebedeva E.V., Likhacheva E.A., Kharchenko S.V. Current geomorphology: Natural risk assessment and environmental and anthropogenic interaction. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2022. V. 92 (3). P. 361–369. DOI: 10.1134/S10193316 22030145.

Shynbergenov Y.A., Maltsev K., Sihanova N. GIS-technologies application for calculation of potential soil loss of Marha River basin (Republic of Saha). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 2017. V. 107 (1): 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012023.

Shynbergenov Y.A., Sihanova N.S. Identification of Large Rivers of Siberia (Ob, Yenisei, Lena) by using GIS technology based on remote sensing of Earth from Cosmos. *Astra Salvensis*, 2017. V. 5. No. 10. Supplement 1. P. 541–545.

Vogt J.V., Colombo R., Bertolo F. Deriving drainage networks and watershed boundaries. A new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. *Geomorphology*, 2003. No. 53. P. 281–298.

Yermolayev O.P., Maltsev K.A., Ivanov M.A. Automated construction of the boundaries of basin geosystems for the Volga Federal District. *Geography and Natural Resources*, 2014. V. 35. No. 3. P. 222–228 (in Russian).