

О.П. ЕРМОЛАЕВ*, С.С. МУХАРАМОВА*, К.А. МАЛЬЦЕВ*, М.А. ИВАНОВ*,
А.М. ГАФУРОВ*, А.А. САВЕЛЬЕВ*, Е.А. ШЫНБЕРГЕНОВ***, П.О. ЕРМОЛАЕВА*,
А.О. БОДРОВА*, Р.О. ЯНЦИТОВ***

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, Россия, oyermol@gmail.com, smukhara@gmail.com,
mlcvkirill@mail.ru, maximko-87@mail.ru, gafurov.kfu@gmail.com, Anatoly.Saveliev.aka.saa@gmail.com,
polina.ermolaeva@gmail.com, anastasiaerm5@gmail.com, romayantsitov@mail.ru

**Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
308015, Белгород, ул. Победы, 85, Россия, oyermol@gmail.com

***Кызылординский университет им. Коркыт Ата,
120000, Кызылорда, ул. Айтеке Би 29А, Казахстан, shynbergenov.erlan@mail.ru

ГЕОГРАФИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ РОССИИ В МОЗАИКЕ РЕЧНЫХ БАСЕЙНОВ

Для территории почти всей материковой части России общей площадью около 17 млн км² средствами ГИС-технологий впервые построена электронная векторная карта бассейнов малых рек и их межприточных пространств с региональным уровнем пространственной детальности (м-б 1:1 000 000). В качестве цифровой модели рельефа использована глобальная модель GMTED2010. Общее количество бассейновых геосистем составляет 388 627, их средняя площадь 47,8 км². Выделенные бассейновые геосистемы выступили операционно-территориальными единицами, относительно которых создана геобаза пространственных данных, характеризующих природно-ресурсный потенциал и геоэкологию России. Для значительной части страны создан геопортал открытого доступа «Речные бассейны Европейской части России», где размещена вся полученная информация. В статье приводятся примеры решения задач на базе сформированной ГИС и бассейнового подхода. Цифровая мозаика бассейнов малых рек позволяет «собирать» для проведения географического анализа территории как различного масштабного уровня (от локального до трансрегионального), так и различной таксономии (от водосборов крупных рек до федеральных округов России). Приведены такие примеры с созданием специализированных ГИС для великих рек Сибири — Оби и Лены и ряда федеральных округов — Приволжского и Сибирского. На основе созданной карты бассейнов и ГИС решается ряд крупных географических и геоэкологических задач: оценка современной интенсивности эрозии почв, густоты овражного расчленения, моделирования водного стока рек и антропогенного воздействия на бассейновые геосистемы.

Ключевые слова: бассейновые геосистемы, ГИС, эрозия, геопортал, моделирование, сток рек.

O.P. ERMOLAEV*, S.S. MUKHAROMOVA*, K.A. MALTSEV*, M.A. IVANOV*,
A.M. GAFUROV*, A.A. SAVELIEV*, E.A. SHYNBERGENOV***, P.O. ERMOLAEVA*,
A.O. BODROVA*, R.O. YANTSITOV***

*Kazan (Volga Region) Federal University,
420008, Kazan, ul. Kremlevskaya, 18, Russia, oyermol@gmail.com, smukhara@gmail.com,
mlcvkirill@mail.ru, maximko-87@mail.ru, gafurov.kfu@gmail.com, Anatoly.Saveliev.aka.saa@gmail.com,
polina.ermolaeva@gmail.com, anastasiaerm5@gmail.com, romayantsitov@mail.ru

**Belgorod State National Research University,
308015, Belgorod, ul. Pobedy, 85, Russia, oyermol@gmail.com

***Korkyt Ata Kyzylorda University,
120000, Kyzylorda, ul. Aiteke Bi, 29A, Kazakhstan, shynbergenov.erlan@mail.ru

GEOGRAPHY AND GEOECOLOGY OF RUSSIA IN THE MOSAIC OF RIVER BASINS

For the first time, an electronic vector map of small river basins and their interfluves with a regional level of spatial detail (1:1 000 000) was created using GIS-technology for the territory of mainland Russia with a total area of almost 17 million sq. km. Global model GMTED2010 was used as a digital elevation model. The total number of basin geosystems is 388 627, and their area averages 47,8 sq. km. The selected basin geosystems were used as operational-territorial units, in relation to which the

geodatabase was created, characterizing the natural resource potential and geocology of Russia. Open access geoportal "River basins of the European part of Russia" was created for a large part of the country, where all information thus obtained is posted. The article provides examples of solutions based on the previously formed GIS and the basin approach. A digital mosaic of small river basins makes it possible to "collect" territories of different scale (from local to transregional) and different taxonomy (from catchments of large rivers to federal districts of Russia) for geographical analysis. Such examples are given with the creation of specialized GIS for the Great Rivers of Siberia: the Ob and Lena, and a number of federal districts: the Volga and Siberian districts. Based on the map thus created of basins and GIS, a number of major geographical and geocological problems are solved: evaluation of current intensity of soil erosion, density of gully erosion, modeling of river runoff and anthropogenic impact on basin geosystems.

Keywords: *basin geosystems, GIS, erosion, geoportal, modeling, river flow.*

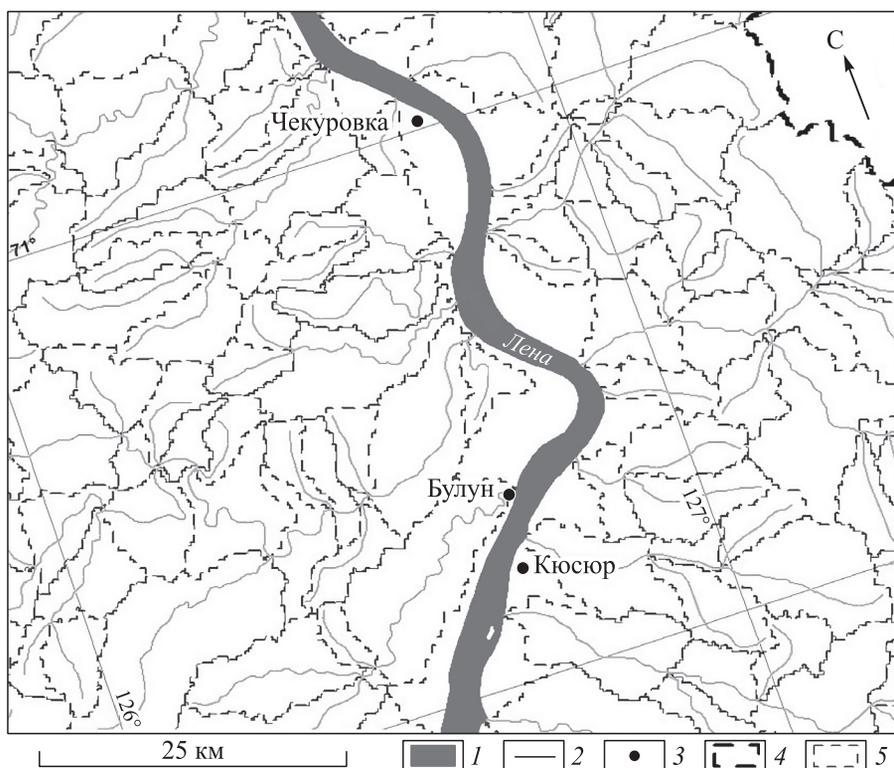
ВВЕДЕНИЕ

Бассейновый подход при проведении географо-геоэкологических исследований широко распространен как в России, так и за рубежом, а также реализован при водохозяйственном районировании территории Российской Федерации. Систематизация всей гидрологической информации осуществляется по бассейновым округам, которые, в свою очередь, последовательно подразделяются на гидрографические (бассейновые) единицы меньшего территориального охвата. Среди открытых источников наиболее полное представление о бассейновом подходе учета водных ресурсов дает Государственный водный реестр, созданный постановлением Правительства Российской Федерации № 253 от 28 апреля 2007 г. «О порядке ведения Государственного водного реестра» [1]. С появлением ЭВМ и специализированного программного обеспечения стали появляться разработки ГИС, где в качестве территориальных единиц анализа выступают речные (водосборные, элементарные) бассейны. Опыт создания гидрологических ГИС, в том числе и тех, к которым имеется общий доступ в сети Интернет, существует и в Российской Федерации, и на территории бывшего СССР. Объективный обзор таких ГИС дан в монографии пермских географов [2]. Большая часть подобных ГИС созданы на локальном либо квазирегиональном пространственном уровнях. К интересным работам, в которых создавались электронные векторные слои границ водосборных бассейнов, можно отнести исследования в бассейне р. Кубани [3] или, например, разработки В.Г. Калинина и С.В. Пьянкова [4]. На глобальном уровне генерализации при создании ГИС речных бассейнов закономерно используется мелкий масштаб [5].

Актуальность использования для географического анализа бассейнов в качестве операционно-территориальных единиц определяется огромным количеством рек в России — более 2,3 млн. Между тем для целей географо-геоэкологических исследований с использованием геоинформационных технологий обработки большого объема данных необходимо создание электронных карт (слоев) границ речных бассейнов различного уровня пространственной детальности с соответствующими геобазы данных. В настоящее время существует целый ряд картографических продуктов с открытым доступом, представляющих собой модели бассейнов разного территориального охвата. Такие продукты могут отличаться по целевому назначению, детальности сети, степени открытости данных и т. д. В качестве примеров можно упомянуть базы геоданных HydroSHEDS, CCM, Ecrins и WBD [6–9]. Открытых отечественных электронных карт бассейнов малых рек, охватывающих всю территорию России, к сожалению, в настоящее время нет. Это обстоятельство определило постановку цели данного исследования: создание электронной карты бассейнов малых рек России и геобазы данных об их природно-ресурсном потенциале средствами геоинформационных технологий для решения широкого круга географических и геоэкологических задач.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Границы бассейнов малых рек для территории исследования построены автоматизированным методом на основе скорректированной модели рельефа и растровой модели гидрографической сети. Создана соответствующая электронная векторная карта. Границы выделялись в автоматическом режиме по алгоритму, реализованному в программном продукте Whitebox GAT [9]. Предварительно выполнялась серия тестовых расчетов в пределах участков с различными условиями рельефа. Обособление бассейнов проведено планарно, т. е. выделялись не только бассейны мелких рек (в принятом масштабе 1:1 000 000 это были водотоки первого порядка), но и их межприточные пространства (см. рисунок).



Карта речных бассейнов (фрагмент) водосбора р. Лены.

1 — русло р. Лены; 2 — речная сеть; 3 — населенные пункты. Границы: 4 — водораздела р. Лены, 5 — бассейнов.

По результатам верификации установлено, что на выбранных тестовых участках средняя разница между показателями площади бассейнов, выделенных автоматически и экспертно (т. е. вручную), составила 3,6 %. Для участков со слабо расчлененным, низменным рельефом эта ошибка не превышает 5 %, а на участках с относительно расчлененным, возвышенным — около 2 %. Такая погрешность может считаться вполне приемлемой, учитывая тот факт, что выделение границ «ручным» методом также не идеально по точности. Детально методика построения границ речных бассейнов изложена в работе [10]. Таким образом, в несколько этапов впервые для территории России на региональном уровне генерализации создана электронная векторная карта бассейнов малых рек. Полигональные объекты слоя бассейнов топологически согласованы с объектами карты гидрографической сети масштаба 1:1 000 000. Общее количество выделенных пространственных объектов (бассейнов) — 388 000.

Следующей крупной задачей исследования стало наполнение геобазы данных. Использовались в основном открытые и фондовые источники. В частности, для европейской части России (ЕЧР) сформирована база данных гидрологической информации по гидропостам, обеспеченных статистикой о среднегодовых расходах воды и/или расходах взвешенных наносов за тот или иной период наблюдений. Введена информация для 2015 гидропостов за весь доступный период наблюдений. Данными многолетних измерений среднегодовых расходов воды обеспечены 2005 постов, данными многолетних измерений среднегодовых расходов взвешенных наносов — 646 постов. Создан также векторный слой точечных объектов, представляющий местоположения гидрологических постов, ведущих наблюдения за стоком воды и/или стоком наносов на реках ЕЧР. Объекты слоя гидропостов топологически согласованы с объектами карты гидрографической сети масштаба 1:1 000 000. Впервые для территории ЕЧР создана векторная карта границ поверхностных водосборов, отнесенных к гидрологическим постам, ведущим режимные наблюдения за стоком рек. Бассейны гидропостов выделялись на основе модели рельефа, подготовленной по GMTED2010, и слоя точечных объектов, представляющих гидрологические посты. Была сформирована геоинформационная система «Речные бассейны России», интегрирующая всю собранную геоинформацию о природно-ресурсном потенциале бассейнов. Атрибутика объектов основных слоев ГИС — слоя бассейнов рек (388 000), а также слоя поверхностных водосборов гидропостов рек (1892 бассейна) включает: идентификатор бассейна; площадь бассейна (км²);

преобладающий тип почвы в бассейне; преобладающий тип почвообразующей породы; преобладающий класс дочетвертичных отложений; преобладающий тип ландшафта; преобладающий подтип ландшафта; лесистость (%); распаханность (%); залуженность (%); кустарники (%); заболоченность (%); озерность (%); средняя высота (м); минимальная высота (м); максимальная высота (м); разброс высот в бассейне (м); средняя крутизна склонов (°); средняя экспозиция склонов (от «холодных» –1 к «теплым» 1); эрозионный потенциал рельефа и осадков в бассейне; длины линий тока (м); средняя годовая температура воздуха (°С); средняя температура воздуха в январе (°С); средняя температура воздуха в июле (°С); среднее многолетнее максимумов температуры за год (°С); среднее многолетнее минимумов температуры за год (°С); среднее многолетнее амплитуды температуры за год (°С); среднее квадратическое отклонение температуры воздуха за год (°С); среднее многолетнее число дней с температурой ниже +8 °С; повторяемость сильных морозов (%); сумма активных температур воздуха (°С); среднее годовое количество осадков (мм); среднее количество осадков в мае–августе (мм); среднее количество осадков за холодный период года (мм); среднее количество осадков за теплый период года (мм); коэффициент вариации годового количества осадков (%); среднее значение гидротермического коэффициента; плотность населения в бассейне (чел. на км²); оценка антропогенной нагрузки на бассейн (балл); модельное значение модуля стока воды в бассейне (м³/с с км²); модельное значение годового слоя стока воды в бассейн (мм); модельное значение модуля стока взвешенных наносов в бассейне (т/год с км²).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Созданная карта бассейновых геосистем России и геобазы данных по их природно-ресурсному потенциалу могут служить хорошей основой для географического и геоэкологического анализа различных территорий страны. Из мозаики бассейнов малых рек можно «собирать», конструировать территории различного масштабного и природно-административного уровня: от водосборов средних и крупных рек, от муниципальных образований до федеральных округов. Приведем несколько примеров результатов исследований и пространственного анализа на базе созданной ГИС и карты бассейнов.

Оценка геоэкологического состояния бассейновых геосистем. Такая оценка проведена на различных масштабных уровнях: в целом для Европейской территории России, для двух федеральных округов: Приволжского (68 787 бассейнов, выделенных по более детальной сетке бассейнов в м-бе 1:200 000) и Сибирского (46 677 бассейнов), а также для водосбора р. Оби (30 738 бассейнов).

Методика оценки геоэкологического состояния бассейновых геосистем создана на основе количественной оценки антропогенной нагрузки на бассейны. В качестве показателей, которые прямо или косвенно отражают антропогенное воздействие, использовались: плотность населения в бассейне, густота дорожной сети (с учетом типа дорог), сельскохозяйственная освоенность территории бассейна. Плотность населения рассматривалась как опосредованная интегральная характеристика, косвенно отражающая степень и направленность хозяйственной освоенности территории. Данный показатель в бассейнах оценивался по информации о численности населения в населенных пунктах ЕЧР (с учетом данных Всероссийской переписи населения 2010 г.) и их пространственной приуроченности к бассейнам. Для расчета густоты дорожной сети в бассейнах использовался слой дорог м-ба 1:500 000, при этом отдельно обрабатывалась информация о дорогах разных категорий (ж/д, автодороги, с покрытием, без покрытия, лесные, полевые, и пр.). Сельскохозяйственная освоенность бассейнов оценивалась по накопленным в ГИС данным о распаханности бассейнов, полученным на основе интерпретации многолетних данных дистанционного зондирования Земли MODIS. Анализировались пространственное поведение указанных переменных, их статистические распределения, мультиколлинеарность, они приводились к единой шкале. Для территории ЕЧР привлекались полученные нами данные об интенсивности почвенной эрозии. Характеристики среднего значения интенсивности эрозии почв на пахотных землях бассейна могут служить дополнительным показателем, отражающим прямую деградацию почвенного покрова через потерю гумусового слоя и сокращение плодородия, а также через объемы перемещаемых наносов в малые реки и поступающие вместе с ними загрязнители. Для обобщения частных переменных опробовались разные методы.

В результате итоговый показатель антропогенной нагрузки был получен как линейная комбинация частных переменных с весовыми коэффициентами, значения которых подобраны экспертным методом с учетом проведенного анализа. Для обобщения частных показателей опробовались разные методы (классификация, главные компоненты, взвешенные баллы). В результате использована наиболее простая линейная оценка: итоговый показатель антропогенной нагрузки получен как среднее

значение из четырех вышеописанных показателей. Итоговый показатель приведен к пяти категориям нагрузки: очень слабая, слабая, умеренная, сильная, очень сильная антропогенная. С использованием описанного подхода и подготовленных геоданных проведено районирование территорий по степени антропогенной нагрузки на речные бассейны (геоэкологическое районирование), представленное в виде векторного слоя и созданной на его основе тематической карты. Для ЕЧР такая карта размещена на разработанном нами геопортале [11].

Количественная оценка стока рек территории России проведена на примере ЕЧР. Задача исследования представляла собой построение моделей формирования водного стока рек и стока взвешенных наносов с помощью множественной регрессии для различных ландшафтных зон ЕЧР, каждая из которых характеризуется уникальными условиями формирования речного стока. Для этого создана геопространственная база данных по наблюдениям за стоком рек. Они получены из открытых и разных источников: опубликованные материалы долгосрочных режимных наблюдений на гидрологических постах (Государственный водный кадастр СССР) [12], открытые источники (Лаборатория Каспийского моря Института водных проблем АН РФ) [13], Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) Федерального агентства водных ресурсов [14] и др. Были сформированы многомерные выборки, элементами которых являются бассейны гидропостов (водосборные территории, отнесенные к точкам расположения гидропостов), обеспеченные данными о стоке воды (1-я выборка, объем 1767) и о стоке взвешенных наносов (2-я выборка, объем 550). Выборки включают зависимую переменную Y — либо модуль стока воды, либо модуль стока наносов в бассейнах. Их величины получены как среднее многолетнее среднегодовых расходов воды или взвешенных наносов, зафиксированных на посту за весь период наблюдений, отнесенное к площади бассейна этого гидропоста. Независимые переменные $\{X\}$, включенные в выборки, — это количественные и качественные характеристики, описывающие условия формирования стока: площадь водосбора, морфометрические характеристики рельефа в бассейне, климатические показатели (отражающие средние значения, размах, сезонные колебания, экстремальные значения температуры и осадков), проценты залесенности, распаханности, залуженности, заболоченности бассейна, оценка антропогенной нагрузки на бассейн, географические координаты центра, преобладающие тип почвы, тип почвообразующей породы, класс дочетвертичных отложений. Анализ статистических зависимостей проводился отдельно по подвыборкам бассейнов гидропостов, расположенных на равнинных и горных территориях. Устойчивость оценок проверялась на подвыборках с различными ограничениями (по площади водосбора, порядку реки) с контролем представительности по изучаемой территории. Для равнинных территорий корреляция Y с независимыми переменными анализировалась как для всей территории, так и в пределах ландшафтных зон.

В ходе статистического анализа исследовались распределения, мультиколлинеарность переменных, частные корреляции, ранговые связи и др. Построение статистических моделей проводилось с использованием методов обобщенных линейных моделей (GLM) и обобщенных аддитивных моделей (GAM). При построении моделей осуществлялся выбор наилучшего подмножества предикторов с учетом статистической значимости их вклада в модель, информационного критерия AIC, анализа VIF-фактора. Все статистические оценки, моделирование, расчеты выполнялись с помощью программ, написанных в статистической среде R (пакеты mgcv, nlme, geoR) [15, 16]. Отметим, что качество построенных моделей для модуля водного стока рек очень неплохое. Модель, полученная для равнинных территорий, объясняет более 80 % изменчивости данных (скорректированный коэффициент детерминации), а для горных (Урал, Кавказ) — около 72 %. Это говорит о том, что модели отражают основные закономерности стока воды в заданном масштабе исследований. К достоинствам построенной статистической модели можно отнести ее хорошую интерпретируемость в терминах уравнения водного баланса (положительный вклад суммы атмосферных осадков, отрицательный вклад температур, отражающий процесс испарения, положительный вклад крутизны рельефа, объясняемый ее обратным влиянием на испарение, положительный вклад залесенности и т. д.). Точность прогноза, даваемого моделью для логарифма модуля стока воды с доверительной вероятностью 95 %, составляет примерно 0,6 (для сравнения, размах выборочных значений составляет 4,3), т. е. ошибка прогноза в пределах 14 % от разброса данных.

Модель модуля стока взвешенных наносов для равнинных территорий строилась с применением нелинейных методов (GAM), что позволило за счет непараметрического представления частных зависимостей объяснить 65 % изменчивости данных. В качестве предикторов в модель вошли средняя крутизна склонов, процент распаханности водосбора, модуль стока воды, площадь водосбора, степень смываемости почв и размываемости почвообразующих пород, преобладающих на водосборе. В модель

также включен зонально-секторный градиент, который может быть задан либо суммой активных температур и СКО температуры воздуха, либо напрямую географическими координатами (долготой/широтой). Этот предиктор отражает влияние на сток наносов латентных факторов, обуславливающих природное (ландшафтное) зонирование территории. Вклад в модель каждого из предикторов хорошо интерпретируется (положительный вклад крутизны склонов тем выше, чем более размываемая почва на водосборе, положительный вклад степени распаханности водосбора также наиболее высок там, где почвы легко размываемые, и уменьшается с увеличением их противоэрозионной устойчивости и т. д.). Нелинейный зонально-секторный фактор дает фоновый тренд — уменьшение (в среднем) стока наносов с юга на север и его увеличение с запада на восток.

В модель, построенную для горных территорий (выборка всего 153), в качестве значимых предикторов вошли эрозионный потенциал рельефа, залесенность бассейнов, модуль стока воды, степень смываемости почв и размываемости почвообразующих пород. При моделировании учитывался фактор приуроченности к типу горных систем (молодые горы Кавказа и старые Урала). Модель, построенная методом GAM, объясняет 68 % изменчивости данных.

На основе полученных моделей выполнены расчеты прогнозных (модельных) значений показателей речного стока для бассейнов рек, планарно покрывающих исследуемую территорию [17]. Тем самым проведена экстраполяция величин речного стока на не изученные в гидрологическом отношении участки этого большого региона страны. Построено картографическое представление полученных результатов: карта модуля стока воды, карта годового слоя стока воды, карта модуля стока наносов в речных бассейнах, большая часть которых доступна на нашем геопортале «Речные бассейны Европейской части России» [11].

Оценка интенсивности эрозии почв. Почвенная эрозия — ключевой фактор, приводящий к физическому сокращению гумусового горизонта и уменьшению ее плодородия, поэтому оценка интенсивности эрозии почв на фоне изменяющегося климата и условий землепользования всегда актуальна. Такая задача на базе получения новых и современных оценок факторов эрозии (эрозионного потенциала осадков и рельефа, почвозащитной роли растительности, запасов воды в снеге) решена нами для двух макрорегионов страны: ЕЧР и бассейна р. Лены. Значения эрозии почвы определены в каждой ячейке растра с шагом 250 м, а затем обобщены на лучшие, с точки зрения интерпретации эрозионного процесса, геосистемные образования — бассейны малых рек. Оценка интенсивности эрозионных потерь почвы за период ливневого поверхностного стока выполнялась на базе модели, даваемой универсальным уравнением потерь почвы (USLE/RUSLE), где смыв почвы (т/га в год) определяется как композиция факторов эрозии: R — фактор осадков (эрозионный потенциал дождевых осадков); K — фактор эродированности (смываемости) почвы; LS — фактор рельефа; C — фактор растительности (хозяйственно-агрономический); P — фактор эффективности противоэрозионных мер, нами не учитывался. Для оценки эрозионных потерь почвы от стока талых вод применялась методика научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ [18]. В ходе исследований разработана методика оценок параметров смыва и получены новые результаты [19, 20] эрозии почв. В частности, это методы и результаты оценки (помесячные, годовые, среднесноголетние) пространственного распределения R-фактора (на основе срочных данных об осадках на метеостанциях и построенных статистических моделей) и C-фактора (на основе обработки и анализа получаемых по данным дистанционного зондирования Земли растров вегетационных индексов NDVI, EVI, фенологических метрик VNP22Q2, биофизического параметра растительности Fcover). Результаты представлены в таблице.

Для европейской территории России значения полученной оценки среднесноголетней (за 2014–2019 гг.) годовой интенсивности почвенной эрозии (soil loss rates) характеризуются следующими величинами: среднее значение 1,3 т/га в год, при этом медиана 0,014 т/га в год, 95%-й квантиль равен 3,7 т/га в год, а 99%-й — 15,5 т/га в год, СКО 15,3 т/га в год. В географическом пространстве в пределах равнинной части интенсивность эрозии почв резко увеличивается на пахотных землях. Для них статистика годовой интенсивности почвенной эрозии следующая: среднее 2,4 т/га в год, медиана 1,2 т/га в год, 95%-й квантиль равен 8,6 т/га в год, 99%-й — 19,0 т/га в год, СКО 4,7 т/га в год. Дождевая эрозия почв составляет 2,1 т/га в год, от стока талых вод — 0,3 т/га в год. Хотя пространственное распределение эрозии почв на пахотных землях носит очень изменчивый характер, можно отметить ряд характерных особенностей этого явления. Так, при генерализации данных с их обобщением по субъектам РФ в пределах равнинной части региона можно выделить два характерных региона с высокой интенсивностью почвенной эрозии. Один из них расположен на западе в лесостепной и степ-

**Количественные показатели параметров эрозии и оценка интенсивности эрозии почв
на пахотных землях Европейской территории России (на 2014–2019 гг.)**

Ландшафтная зона	Фактор						
	C	K	R	LS	Ag	As	A
Северотаежная	0,299	0,008	272,2	0,141	0,106	0,013	0,119
Среднетаежная	0,158	0,035	276,1	0,539	0,804	0,815	1,619
Южнотаежная	0,224	0,054	382,7	0,411	1,942	0,769	2,711
Смешанная и широколиственная	0,310	0,041	414,1	0,509	2,533	0,732	2,711
Лесостепная	0,381	0,026	405,3	0,439	1,788	0,261	2,050
Степная	0,454	0,029	501,0	0,357	2,031	0,128	2,159
Полупустынная и пустынная	0,448	0,036	297,5	0,109	0,634	0,032	0,666

Примечание. С – фактор растительности, безразмерный (от 0 до 1); К – смываемость почвы, (т·га·ч)/(МДж·га·мм); R – эрозионный потенциал осадков, (МДж·мм)/(га·ч) в год; LS – фактор рельефа, безразмерный; Ag – интенсивность дождевого (ливневого) смыва, т/га в год; As – интенсивность талого смыва, т/га в год; A – интенсивность годового тало-дождевого смыва, т/га в год.

ной зонах почти долготного простираия. Здесь интенсивность смыва на пахотных землях увеличивается от 2,5–3,0 т/га в год (Брянская, Ростовская области, Краснодарский край) до 3–5 т/га в год (Белгородская, Курская, Орловская области). Другой район протягивается с запада на восток-северо-восток субширотной полосой в пределах лесостепей и южной части лесной зоны. Здесь общий фон эрозии почвы на пашнях изменяется от почти 3 т/га в год (Калужская, Московская, Нижегородская области, Республики Чувашия, Татарстан) до 3,56 т/га в год в Тульской, Кировской, Пермской областях, Республиках Марий-Эл, Удмуртия. В пределах Мещеры и Окско-Донской равнины, восточной части Приволжской возвышенности в лесостепных и степных ландшафтах интенсивность эрозии почв на пахотных землях снижается от 1,9 до 0,9 т/га в год (Тамбовская, Воронежская, Липецкая, Рязанская, Пензенская, Саратовская области).

По аналогичной методике рассчитаны величины эрозионных потерь почвы в бассейнах малых рек водосбора р. Лены (площадь 2419 тыс. км², 49 570 бассейнов). Результаты этих расчетов показывают, что среднее значение годовых потерь почвы учетом фактора растительности (С-фактор) на территории исследования составляет 0,04 т/га в год. При этом на талый смыв приходится 0,01 т/га в год, на ливневой — 0,03 т/га в год. Благодаря высокой доле лесистости и низменному характеру территории левобережной части бассейна р. Лены на ней доминируют ничтожные величины смыва почв. На эту категорию приходится около 50 %. Небольшой и умеренный смыв почв наблюдается на половине территории бассейна, а очень значительный — менее 0,05 %.

Разработка геопортала «Речные бассейны Европейской России». Еще одно направление исследований — разработка и размещение в сети Интернет геопортала «Речные бассейны Европейской России» [11]. Здесь представлены не только основные результаты нашей работы, но и дается возможность использования как в специализированных исследованиях, так и для образовательных целей созданной геобазы данных по речным бассейнам широким слоям населения в нашей стране и за рубежом. На геопортале с помощью картографических веб-сервисов отображается основная часть геоданных, накопленных в ГИС. Это, прежде всего, слой «Бассейны» — бассейны малых рек и их межприточные пространства. Также присутствуют слои «Гидропосты» — гидрологические посты Росгидромета, на которых представлены данные о среднегодовом водном стоке рек; «Область исследования», показывающий границу изучаемой территории; два слоя в группе «Гидрография», представляющие собой объекты гидрографической сети, представленные на карте масштаба 1:1 000 000. Подробно представлена актуальная геоинформация по климатическим параметрам (16 показателей), состав дочетвертичных образований, почвы, подтипы ландшафтов, лесистость, распаханность, залуженность, заболоченность, плотность населения, антропогенная нагрузка на бассейновые геосистемы, морфометрические показатели, рассчитанные поля значений факторов растительности (С-фактор) и эрозионного потенциала осадков (R-фактор) для оценки интенсивности эрозии почв. Картографически представлены и сама оценка интенсивности почвенной эрозии за периоды дождевого, талого стока, а также суммарные годовые потери почвы от эрозии (т/га в год) в бассейнах рек. Мы также предоставили публичный (открытый) доступ к разработанному ресурсу и к геобазе данных по бассейнам рек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования практически для всей территории России была создана электронная карта и специализированная ГИС на бассейны малых рек с геобазой данных по их природно-ресурсному потенциалу. Карта бассейновых геосистем страны представлена в виде векторного планарного слоя полигональных объектов (бассейнов рек и их межприточных пространств). В макрорегионах России выделено: в Европейской части — 53 865 бассейнов малых рек со средней площадью 71 км²; в Азиатской части (Арктический и Тихоокеанский водосборы) — 334 762 бассейнов со средней площадью 40 км². Результирующий слой бассейнов малых рек России содержит 388 627 объектов (бассейнов) со средней площадью около 47,8 км². Оценка природно-ресурсного потенциала и хозяйственного освоения речных бассейнов проведена на основе анализа имеющихся в открытом доступе данных многолетнего мониторинга, использования материалов дистанционного зондирования Земли, накопленного фонда картографических материалов. В созданной специализированной ГИС тематическая, аналитическая и комплексная геоинформация представлена с достаточно высокой степенью пространственной детальности, учитывая территорию таких размеров. Приведенные примеры географо-геоэкологического анализа свидетельствуют о широких возможностях использования созданного информационного продукта для географической оценки территорий различного уровня генерализации при решении задач по пространственному развитию регионов России.

Для макрорегиона страны создан геопортал «Речные бассейны Европейской части России». К ресурсу предоставлен публичный (открытый) доступ, что делает доступной для широкой научной общественности созданную карту границ речных бассейнов с геоинформационной базой данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (22-17-00025, 20-67-46017), в рамках Программ стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета — «Приоритет 2030» (фондовые материалы и базы данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постановление** Правительства РФ от 28 апреля 2007 г. 253 «О порядке ведения государственного водного реестра» [Электронный ресурс]. — <https://base.-garant.ru/12153226/> (дата обращения 20.01.2023).
2. **Калинин В.Г., Пьянков С.В.** Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях. — Пермь: Алекс-Пресс, 2010. — 217 с.
3. **Погорелов А.В., Думит Ж.А.** Рельеф бассейна р. Кубани: Морфологический анализ. Рельеф бассейна р. Кубани. — М.: ГЕОС, 2009. — 206 с.
4. **Гидрологическая ГИС «Водохранилища Камского каскада».** Свид. о государственной регистрации базы данных № 010620079. — 2010.
5. **Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Mozzherin V.V., Mozzherin V.I.** Global geoinformation system «Suspended sediment yield in the river basins of the Earth» // Geomorphology RAS. — 2012. — N 2. — С. 50–58.
6. **Lehner B., Grill G.** HydroBASINS: Global watershed boundaries and sub-basin delineations derived from HydroSHEDS data at 15 second resolution—Technical documentation version 1. с. HydroBASINS. — с. Technical report [Электронный ресурс]. — <https://www.hydrosheds.org/images/inpages> (дата обращения 20.01.2023).
7. **Vogt J., Soille P., De Jager A., Rimaviciute E., Mehl W., Foisneau S., Bodis K., Dusart J., Paracchini M.L., Haastrop P.** A pan-European river and catchment database // Report EUR. — 2007. — Vol. 22920. — P. 120.
8. **Eea E.E.A.** Catchments and Rivers Network System, ECRINSv1. 1 // EEA Technical Report. — 2012. — N 7. — P. 111.
9. **Lehner B., Verdin K., Jarvis A.** New global hydrography derived from spaceborne elevation data // Eos, Transactions American Geophysical Union. — 2008. — Vol. 89, N 10. — P. 93–94.
10. **Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Иванов М.А.** Автоматизированное построение границ бассейновых геосистем для Приволжского федерального округа // География и природ. ресурсы. — 2014. — № 3. — С. 32–39.
11. **Речные бассейны Европейской части России** [Электронный ресурс]. — <http://bassepr.kpfu.ru/> (дата обращения 26.05.2021).
12. **Ресурсы** поверхностных вод СССР. Т. 1 / Под ред. Ю.А. Елшина, В.В. Куприянова. — Мурманск; Л.: Мурманск. управл. гидрометеорол. службы; Гос. гидролог. ин-т; Гидрометеиздат, 1970. — 316 с.
13. **Лаборатория** Каспийского моря Института водных проблем АН РФ [Электронный ресурс]. — <http://caspi.ru/> (дата обращения 13.07.2022).
14. **Автоматизированная** информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Федеральное агентство водных ресурсов [Электронный ресурс]. — <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 20.01.2023).

15. **R Core Team** (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna: Austria. R Core Team (2014). R [Электронный ресурс]. — <https://www.r-project.org/> (дата обращения 20.01.2023).
16. **R: The R Project** for Statistical Computing [Электронный ресурс]. — <https://www.r-project.org/> (дата обращения 20.01.2023).
17. **Yermolaev O., Mukharamova S., Vedeneva E.** River runoff modeling in the European territory of Russia // CATENA. — 2021. — Vol. 203. — P. 105327.
18. **Ларионов Г.А.** Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. — 200 с.
19. **Maltsev K., Yermolaev O.** Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia // CATENA. — 2020. — Vol. 195. — P. 104726.
20. **Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г.** География динамики земледельческой эрозии почв на европейской территории России // Почвоведение. — 2017. — № 11. — С. 1390–1400.

Поступила в редакцию 01.07.2022

После доработки 22.11. 2022

Принята к публикации 05.04.2023