

DOI 10.31509/2658-607x-202252-105
УДК 630.43

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРЕДИКТОРОВ В ЦЕЛЯХ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМНЫХ ФУНКЦИЙ ЛЕСОВ НА ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЕ

© 2022 г.

М. С. Савин¹, А. С. Плотникова², А. Н. Нарыкова²

¹Географический факультет МГУ им. В.М. Ломоносова

²Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук.
Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14

E-mail: odm244@gmail.com

Поступила в редакцию: 18.04.2022

После рецензирования: 15.05.2022

Принята к печати: 25.05.2022

В статье приведен опыт применения ГИС-технологий для создания пространственных предикторов в целях дальнейшего их использования при моделировании и картографировании динамики функций лесных экосистем. Исследование проведено на территории Данковского участкового лесничества, расположенного на юге Московской области. Выполнен ГИС-анализ пространственных данных, содержащих информацию о рельефе и гидрографической сети района исследования. В результате созданы морфометрические величины, описывающие поверхностный сток и высотную зональность района исследования. В статье описаны ГИС-инструменты, позволяющие создавать тематические геопространственные продукты: экспозиция, крутизна и кривизна склона; направление, расстояние и длина линии стока, суммарный сток; средняя высота над уровнем моря и расстояние до реки. Кроме того, средствами ГИС-анализа выделены границы водосборных бассейнов рек, в пределах которых в дальнейшем планируется также выполнение моделирования климаторегулирующих функций лесов, связанных с циклом углерода.

Ключевые слова: ГИС-анализ, леса, климаторегулирующие функции и услуги, морфометрическая величина рельефа, ЦМР, SRTM, OSM

Природные экосистемы характеризуются протекающими в них экосистемными процессами — физическими, химическими и биологическими действиями или событиями, связывающими организмы и окружающую их среду

(Ecosystem processes, 2022). В свою очередь, совокупность физических, биологических, химических и иных процессов, поддерживающих целостность и сохранение экосистемы, принято называть экосистемными функциями

(Ansink et al., 2008). Под экосистемными услугами понимают выгоды, которые люди получают от экосистем (Alcamo et al., 2005).

В соответствии с классификацией Millennium Ecosystem Assessment (2005) выделяется четыре категории экосистемных услуг, основанных на видах приносимой человеку пользы: обеспечивающие, регулирующие, культурные и поддерживающие. Различные механизмы экосистемного регулирования показателей окружающей среды принято относить к регулирующим услугам, в частности регулирование климата, гидрологического режима, контроль эрозии, опыление и другие. Как отмечают авторы работы (Лукина и др., 2020), картографирование климаторегулирующих услуг лесов, связанных с функциями продуцирования биомассы, регулирования циклов углерода и азота, формированием естественного плодородия почв и др., является важнейшей научной задачей, имеющей большую ценность с точки зрения исследования их связей с биоразнообразием, а также создания систем поддержки принятия решений.

К настоящему времени картографирование экосистемных функций и услуг на локальном уровне получило наибольшее развитие в странах Западной Европы (Испания, Италия, Германия, Швеция и др.) и США. Многие исследования направлены на оценку

и картографирование комплекса экосистемных услуг, включая регулирование климата (Burkhard et al., 2009; Palomo et al., 2013; Felipe-Lucia et al., 2014; Истомина, Лужкова, 2017). Отдельные работы посвящены картографированию накопления углерода в почвах (Chan et al., 2006; Garcia-Pausas et al., 2007); стабильности почвы (Nelson et al., 2009; Felipe-Lucia et al., 2014; Bruno et al., 2021); регуляции стока (Burkhard et al., 2009; Nedkov et al., 2015) и качества водных ресурсов (Bruno et al., 2021).

Согласно современным исследованиям, картографирование экосистемных функций и услуг может включать построение регрессионных моделей посредством методов машинного обучения. Целью настоящей работы является создание предикторов путем проведения ГИС-анализа пространственных данных для дальнейшего их использования при моделировании и картографировании экосистемных функций леса, в том числе климаторегулирующих.

ОБЪЕКТЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследована территория Данковского участкового лесничества, расположенного на юге Московской области на границе Москворецко-Окской и Заокской физико-географических провинций (Атлас ГУГК, 1976) (рис. 1, стр. 3). Для рельефа южной части Под-

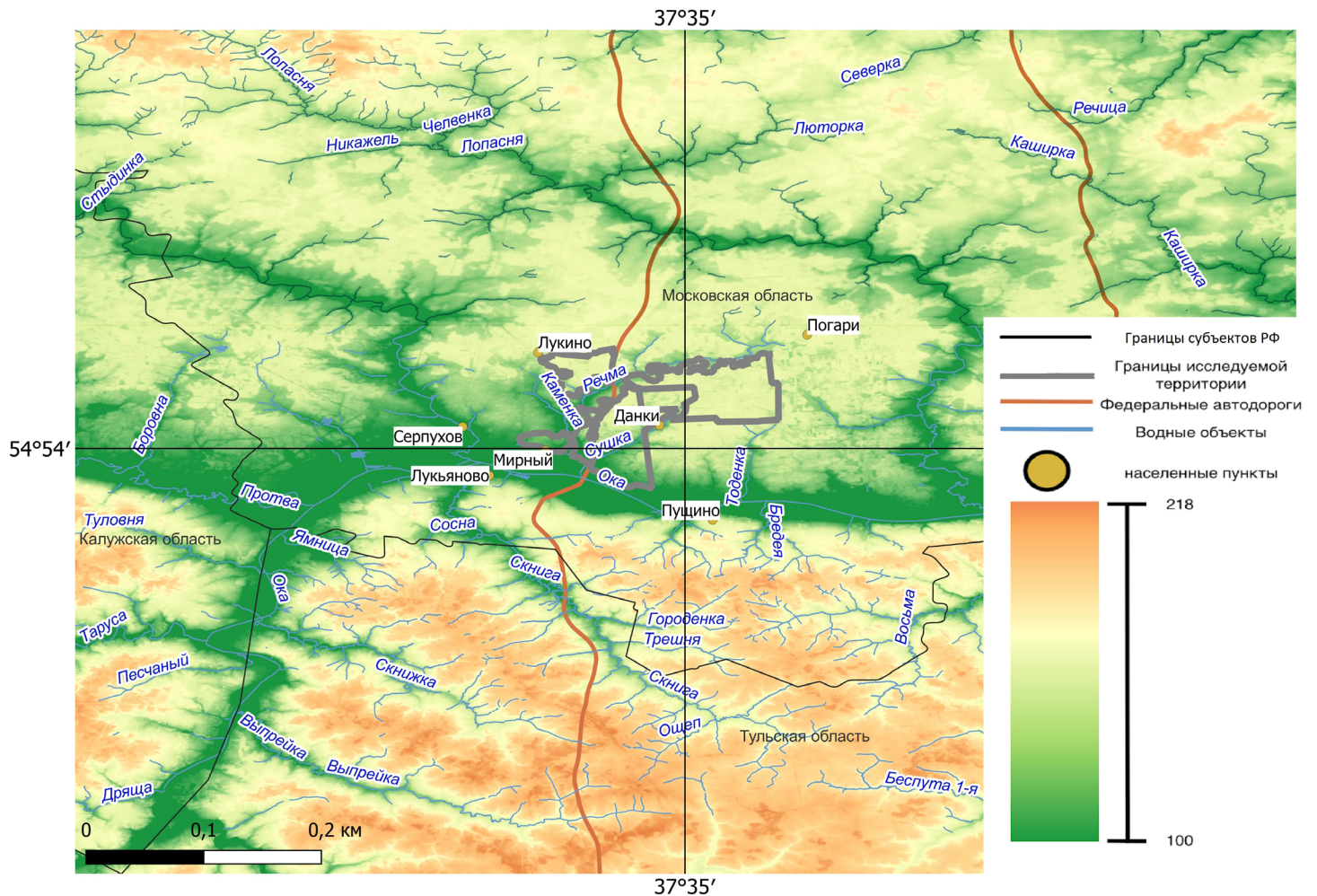


Рисунок 1. Район исследования — Данковское участковое лесничество Московской области

московья характерны широкие, хорошо разработанные долины рек и развитая овражно-балочная сеть. Помимо этого, встречаются такие карстовые формы рельефа, как воронки, пещеры, провалы в местах близкого залегания к поверхности карбонатных пород каменноугольного периода (Вагнер, Манучарянц, 2003). Подобные формы рельефа характерны для Приокско-Террасного биосферного заповедника, граничащего с территорией исследования.

Исследование заключалось в анализе пространственных данных, содержащих информацию о рельефе и гидрографической сети объекта исследования, средствами географической информационной системы (ГИС). Для ГИС-анализа гидрографической сети использовались открытые данные картографического проекта OpenStreetMap (OSM). Данные OSM предоставляются в распространенных геоинформационных форматах, разделены по слоям

и отличаются четкой структурой атрибутивной информации.

В настоящее время наиболее распространены два вида цифровых моделей рельефа (ЦМР) — растровые с регулярной сетью высот (GRID) и модели TIN с нерегулярной триангуляционной сетью. Среди множества существующих ЦМР (GMTED2010, ASTER GDEM2, SPOT DEM, Next Map, NextMap World 30, TanDEM-X Global DEM и др.) для проведения исследования была выбрана растровая модель Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) с размером ячейки сетки 30 × 30 м. Модель получена методом радиолокационной съемки со спутника сенсорами SIR-C и X-SAR и охватывает территорию Земли между 60° с. ш. и 54° ю. ш. (USGS ..., 2022). Как отмечено в работе Ю. И. Карионова (2010), SRTM имеет высокую степень соответствия рельефа топографическим картам масштаба 1:100 000 — 1:50 000.

ИНСТРУМЕНТЫ ГИС-АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

При моделировании климаторегулирующих функций лесов на локальном уровне, в частности запасов углерода в минеральных горизонтах почв, целесообразно исследовать влияние морфометрических величин, описывающих поверхностный сток и высотную зональность территории (Кузнецова и др., 2020) (рис. 2, стр. 5). Под морфометрической величиной (МВ) понима-

ется числовая характеристика рельефа, определенная в каждой точке карты, такая как высота, крутизна или ориентация склона (Шарый, 2006). Обозначенные МВ наряду с расчлененностью (изрезанностью) местности, геометрическими формами и терморежимом склонов являются одними из основных аспектов действия рельефа на функционирование экосистемы.

В работе использовалось программное обеспечение компании ESRI (Environmental Systems Research Institute) — географическая информационная система ArcGIS Desktop, дополненная модулем пространственного моделирования и анализа Spatial Analyst. Модуль позволяет создавать, анализировать и отображать в картографическом интерфейсе растровые данные. Помимо этого, Spatial Analyst используется при решении задач векторизации растровых данных.

Определение морфометрических величин, описывающих поверхностный сток

Модуль ArcGIS Spatial Analyst содержит инструменты группы гидрология “Hydrology”, применяемые для моделирования движения воды по поверхности с помощью цифровой модели рельефа. Тематические инструменты этой группы могут использоваться независимо либо последовательно для построения сети водотоков или

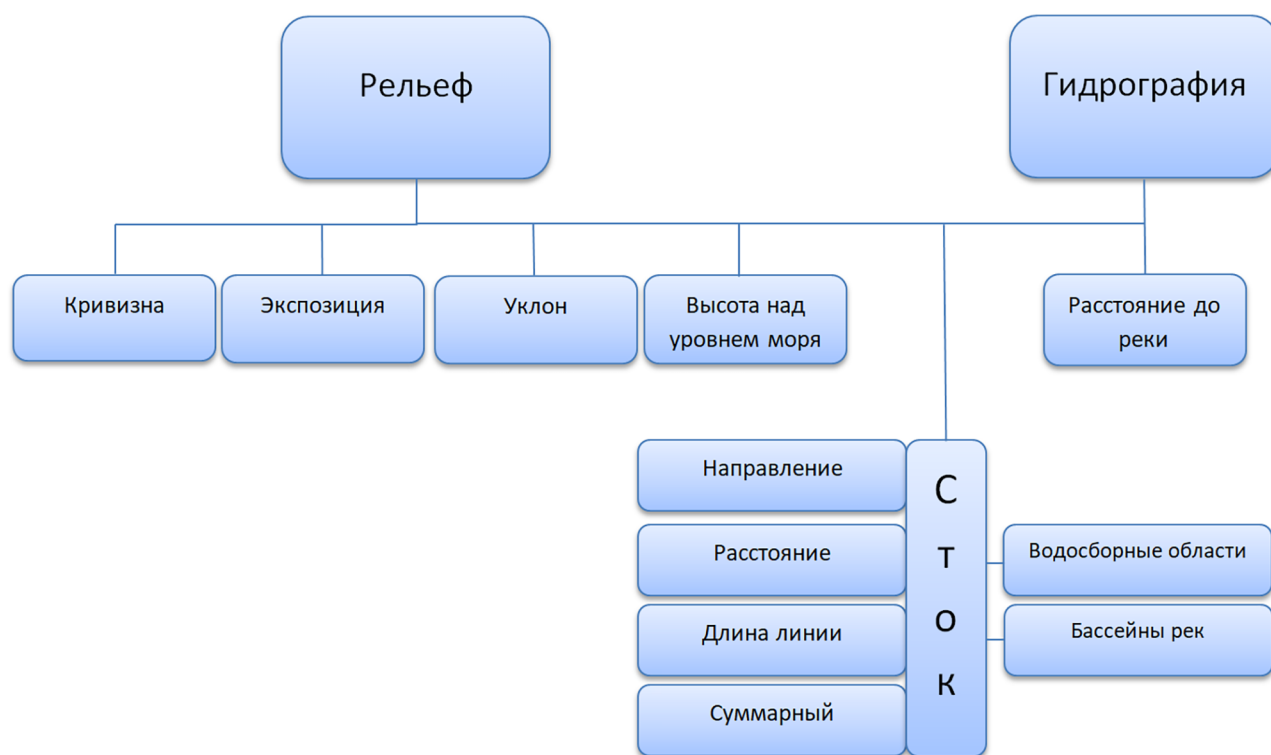


Рисунок 2. Принципиальная схема подготовки пространственных предикторов

выделения водоразделов. Были применены следующие инструменты: направление “Flow Direction”, расстояние “Flow Distance” и длина линии “Flow Length” стока, суммарный сток “Flow Accumulation” (Обзор группы инструментов Гидрология).

Инструмент “Flow Direction” создает растровый слой направления стока из каждого пиксела ЦМР в направлении соседа с наибольшим уклоном вниз по склону. Используются методы одиночного и множественного направления стока. В случае одиночного направления сток из ячейки осуществляется исключительно в одну соседнюю ячейку, при множественном направле-

нии сток распределяется между различными соседними ячейками. В работе использовался метод одиночного направления стока D8, подразумевающий сток в единственную ячейку из восьми соседних. Подробное описание инструмента “Flow Direction” приведено в статье А. С. Плотниковой и др. (2017).

Инструмент “Flow Length” вычисляет длину стока внутри бассейна реки. Входными данными является растровый слой направления стока. Инструмент предоставляет возможность выбора направления измерения длины линии стока: вниз либо вверх по склону до линии водораздела во-

досборного бассейна. Полученный результат находит применение при решении широкого круга эколого-гидрологических задач, в частности расчета времени прохождения воды до замыкающего створа или для моделирования поверхностного стока.

Инструмент *“Flow Distance”* вычисляет минимальное расстояние по стоку до ячейки, в которую осуществляется сток. Инструмент анализирует растровый слой направления стока D8. Для каждой ячейки определяется один возможный путь вниз по склону до ячейки стока, вдоль которого измеряется расстояние стока. Помимо ЦМР и направления стока, для работы *“Flow Distance”* требуются растровые данные водотоков. Исходные векторные данные водотоков OSM были переведены в растровое представление с помощью инструмента *“Polyline to Raster”* группы *“To Raster”* модуля преобразования данных Conversion Tools. Ячейки получаемого растрового слоя относятся к тому или иному пространственному объекту в результате применения метода максимальной либо комбинированной длины. Инструмент предоставляет возможность интерактивного выбора метода.

Инструмент *“Flow Accumulation”* используется для создания растрового слоя суммарного стока в каждый пиксел ЦМР. Входными данными является растровый слой направления стока.

Пикселы полученного растрового слоя с высоким значением суммарного стока являются зонами концентрации стока, с нулевым значением — участками линии водораздела (Jenson, Domingue, 1988). Инструмент позволяет устанавливать количество пикселов, которые участвуют в анализе стока. Помимо этого, на основе растрового слоя направления стока модуль ArcGIS Spatial Analyst позволяет выделять границы водосборных бассейнов рек (рис. 3, стр. 9). Используются инструменты *“Basin”* или *“Watershed”*, подробное описание которых приведено в публикации А. С. Плотниковой и А. О. Харитоновой (2018).

Для определения экспозиции, крутизны и кривизны склонов привлечены инструменты группы *“Surface”*: *“Aspect”*, *“Slope”* и *“Curvature”* соответственно (Обзор группы инструментов «Растровая модель поверхности»). Инструмент *“Aspect”* позволяет получить растровую поверхность экспозиции с помощью метода «скользящего окна» размером 3×3 ячейки. Получаемый результат характеризует пространственную ориентацию элементарного склона ЦМР. Измерения выполняются по часовой стрелке в градусах от 0 (север) до 360 (снова север), проходя полный круг.

Инструмент *“Slope”* определяет крутизну склона — степень изменения поверхности в горизонтальном и вер-

тикальном направлениях. Инструмент находит максимальное изменение высоты на единицу расстояния между анализируемой ячейкой и восемью соседними. В результате создается растровый слой крутизны склонов в двух различных единицах измерения – градусах или процентах.

Инструмент “Curvature” создает растровый слой стандартной кривизны склона, учитывающей кривизну профиля и плановую. Кривизна профиля описывает угол максимального уклона и строится параллельно склону. Таким образом, кривизна профиля характеризует скорость потоков на поверхности. Отрицательное значение кривизны профиля указывает на выпуклость поверхности в анализируемой ячейке – поток замедляется. Положительное значение характеризует вогнутую поверхность – поток ускоряется. Нулевое значение – поверхность линейна и имеет постоянный угол наклона. Плановая кривизна – это перпендикуляры, проведенные к углу максимального уклона. Плановая кривизна характеризует горизонтальное направление потока – конвергенцию и дивергенцию потока на поверхности. Положительное значение плановой кривизны указывает на горизонтально-выпуклую поверхность в анализируемой ячейке. Отрицательное значение – на горизонтально-вогнутую поверхность. Нулевое значение также

характеризует поверхность с постоянным углом наклона. Одновременный учет обоих видов кривизны, называемый стандартной кривизной, позволяет лучше понять закономерности перераспределения вещества в жидкой или твердой форме по склону.

Определение морфометрических величин, описывающих высотную зональность

Инструмент “Zonal Statistics as Table” группы “Zonal” позволяет найти значение средней высоты над уровнем моря в пределах лесотаксационного выдела, который в дальнейшем будет служить пространственной единицей регрессионного моделирования экосистемных функций объекта исследования. Входными данными инструмента “Zonal Statistics as Table” являлись ЦМР SRTM и векторный слой границ лесотаксационных выделов. В результате была получена таблица, записи которой содержат значение средней высоты в пределах выдела.

Заключительным предиктором, созданным посредством ГИС-анализа пространственных данных, является расстояние до реки, вычисление которого выполнялось в два этапа. Во-первых, нахождение центроида полигона лесотаксационного выдела. Эта задача была выполнена с помощью инструмента “Feature To Point” груп-

пы “Features” модуля управления данными ArcGIS Data management tools. Инструмент переводит входные полигональные объекты в выходные точки — центроиды полигонов. Во-вторых, вычисление расстояния от центроида полигона выдела до объекта гидрологической сети посредством инструмента “Near” группы “Proximity” модуля анализа данных ArcGIS Analysis Tools.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования были созданы морфометрические величины, описывающие поверхностный сток (направление, расстояние и длина линии стока, суммарный сток; экспозиция, крутизна и кривизна склона) и высотную зональность (средняя высота над уровнем моря) Данковского участкового лесничества. Полученные морфометрические величины могут рассматриваться в качестве предикторов моделирования климаторегулирующих функций, в том числе связанных с циклом углерода и формированием водного стока.

На рисунке 3 (стр. 9) представлены выделенные границы водосборных бассейнов рек района исследования. Как можно увидеть, они хорошо коррелируют с результатами ученых Казанского федерального университета (Ермолаев

и др., 2017). Казанские исследователи предлагают использовать полученную ими карту речных бассейнов Европейской территории России при проведении различных геоэкологических оценок. Примеры современных научных исследований, использующих бассейн реки в качестве объекта мониторинга природной среды, достаточно многочисленны (Смолянинов и др., 2007; Лисецкий и др., 2014; Харитонов и др., 2019).

Границы речных бассейнов Европейской территории России выделены на основе ЦМР GMTED2010, имеющей разрешение 250 м. Следует отметить, что, помимо границ, карта содержит данные о природе, ресурсном потенциале и экологическом состоянии бассейна. Подобная тематическая информация будет полезна при проведении оценки климаторегулирующих функций лесов, связанных с циклом углерода, например динамик запасов углерода и формирование гидрологического режима.

Приведенное описание инструментов ГИС-анализа данных о рельефе и гидрографической сети для определения направления, расстояния и длины линии стока, а также экспозиции, крутизны и кривизны склона представляет интерес при проведении различных экологических исследований в рамках бассейновой концепции природопользования.

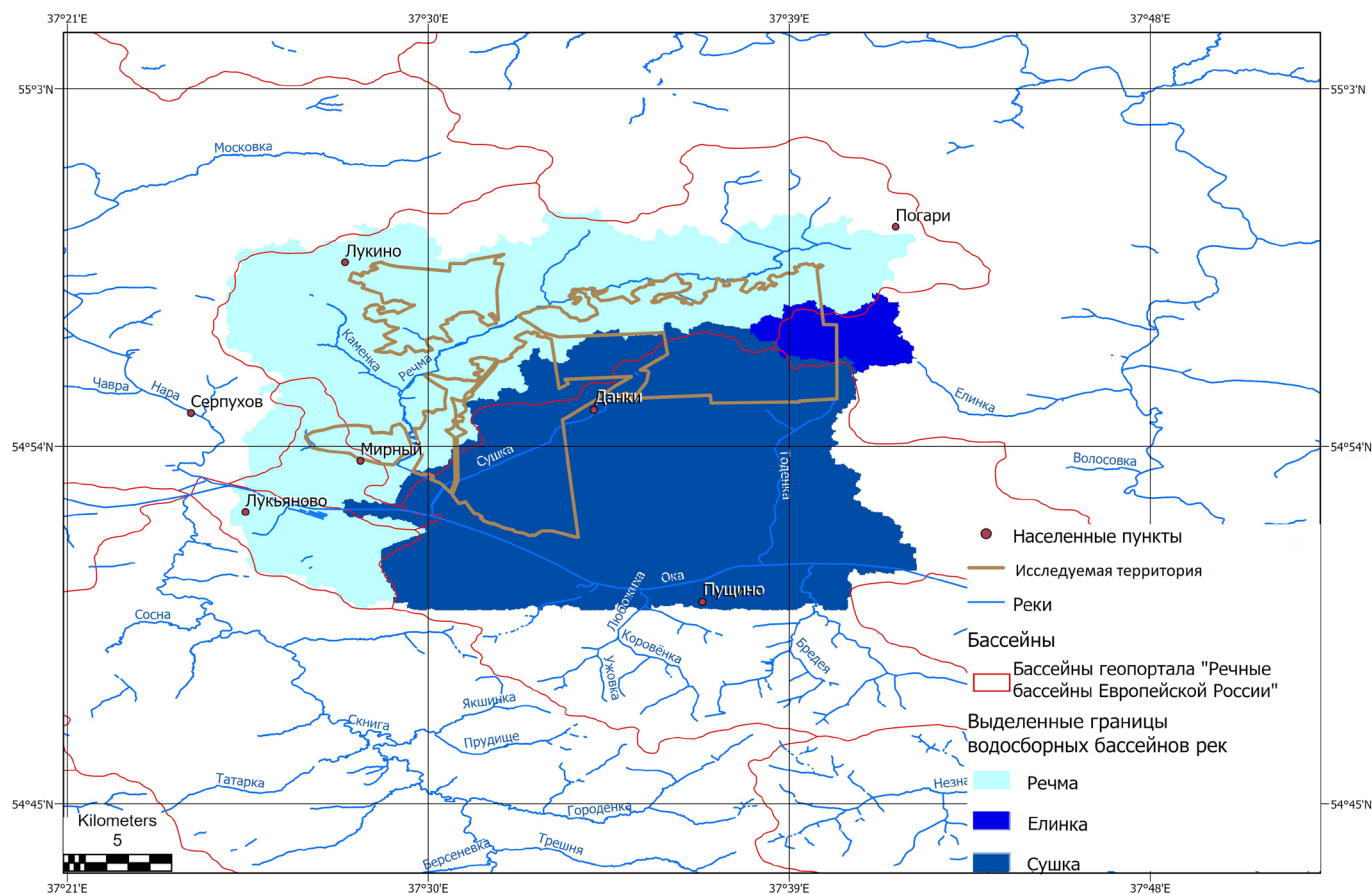


Рисунок 3. Выделенные границы водосборных бассейнов рек

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН (регистрационный номер 1022090800034-7-1.6.19) в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации

№ 2515-р от 2 сентября 2022 г. в целях реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас ГУГК. Научно-редакционная картосоставительская часть ГУГК. Московская область. 1976. URL: <https://clck.ru/rL4yh> (дата обращения 15.01.2022).

Вагнер Б. Б., Манучарянц Б. О. Геология, рельеф и полезные ископаемые московского региона. М.: МПГУ, 2003. С. 50–65.

Ермолаев О. П., Мальцев К. А., Мухарова С. С., Харченко С. В., Ведене-

- ева Е. А. Картографическая модель речных бассейнов Европейской России // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 27–36.
- Истомина Е. А., Лужкова Н. М. Картографирование экосистемных услуг в Забайкальском национальном парке // Геодезия и картография. 2017. Т. 78. № 7. С. 59–67.
- Карионов Ю. И. Оценка точности матрицы высот SRTM // Геопрофи. 2010. № 10. С. 48–51.
- Кузнецова А. И., Лукина Н. В., Горнов А. В., Горнова М. В., Тихонова Е. В., ... & Генникова Н. В. Запасы углерода в песчаных почвах сосновых лесов на западе России // Почвоведение. 2020. № 8. С. 959–969.
- Лисецкий Ф. Н., Григорьева О. И., Кириленко Ж. А. Научное сопровождение бассейновой организации природопользования в Белгородской области // Двадцать девятое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. М.: Межвузовский научно-координационный совет по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ, 2014. С. 106–107.
- Лукина Н. В., Гераськина А. П., Горнов А. В., Шевченко Н. Е., Куприн А. В., ... & Горнова М. В. Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований // Вопросы лесной науки. Т. 3. № 4. 2020. С. 1–90. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90.
- Обзор группы инструментов Гидрология (Hydrology) / ArcGIS for Desktop. URL: <https://clck.ru/rL5FL> (дата обращения 17.01.2022).
- Обзор группы инструментов Растровая модель поверхности / ArcGIS for Desktop. URL: <https://clck.ru/rL6Ao> (дата обращения 25.01.2022).
- Плотникова А. С., Ершов Д. В., Харитонова А. О. Использование ГИС-технологий при картографировании пожарных режимов лесных экосистем Печоро-Илычского заповедника // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения. Сборник материалов II междунар. науч.-практ. конф.: 8–10 ноября 2017 г. СПб: Политехника, 2017. С. 464–470.
- Плотникова А. С., Харитонова А. О. Выделение границ водосборных бассейнов рек на локальном пространственном уровне // Вопросы лесной науки. 2018. Т. 1. № 1. С. 1–10. DOI: 10.31509/2658-607x-2018-1-1-1-10.
- Почвенная карта Московской области. Производственное картосоставительское объединение «Картография» Госагропром РСФСР, 1985. URL: <https://clck.ru/rL28X> (дата обращения 25.01.2022).
- Смольянинов В. М., Дегтярев С. Д., Щербинина С. В. Эколого-гидрологическая оценка состояния речных

- водосборов Воронежской области: Монография. Воронеж: Истоки, 2007. 133 с.
- Харитонова А. О., Плотникова А. С., Ершов Д. В. Современные и исторические пожарные режимы Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2. № 3. С. 1–17. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-17.
- Шарый П. А. Геоморфометрия в науках о Земле и экологии, обзор методов и приложений // Известия Самарского научного центра РАН. 2006. Т. 8. № 2. С. 458–473.
- Alcamo J., Ash N., Bennett E., Biggs R., Butler C., ... & Zurek M. Ecosystems and human wellbeing: a framework for assessment. Washington, D.C., USA, Island Press., 2003. 245 p.
- Ansink E., Hein L., Hasund K. P. To value functions or services? An analysis of ecosystem valuation approaches // Environmental Values. 2008. Vol. 17. No 4. P. 489–503.
- Bruno D., Sorando R., Álvarez-Farizo B., Castellano C., Céspedes V., Gallardo B., ... & Comín F. A. Depopulation impacts on ecosystem services in Mediterranean rural areas // Ecosystem Services. 2021. Vol. 52. Article 101369.
- Burkhard B., Kroll F., Müller F. Windhorst W. Landscapes' Capacities to Provide Ecosystem Services — a Concept for Land-Cover Based Assessments // Landscape Online. 2009. No 15. P. 1–22.
- Chan K. M. A., Shaw M. R., Cameron D. R., Underwood E. C., Daily G. C. Conservation planning for ecosystem services // PLoS Biology. 2006. Vol. 4. No 11. P. 379.
- Ecosystem processes / GreenFacts. URL: <https://clck.ru/rL978> (May 15, 2022).
- Felipe-Lucia M. R., Comín F. A., Bennett E. M. Interactions among ecosystem services across land uses in a floodplain agroecosystem // Ecology and Society. 2014. Vol. 19. No 1. Article 20.
- Garcia-Pausas J., Casals P., Camarero L. Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: effects of climate and topography // Biogeochemistry. 2007. Vol. 82. No 3. P. 279–289.
- Jenson S. K., Domingue J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988. Vol. 54. No 11. P. 1593–1600.
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being; Island Press: Washington, DC, USA, 2005. Vol. 5. URL: <http://www.millenniumassessment.org/en/Reports.aspx#> (April 12, 2021).
- Nedkov S., Boyanova K., Burkhard B. Quantifying, Modelling and Mapping Ecosystem Services in Watersheds //

Ecosystem Services and River Basin Ecohydrology. 2015. P. 133–149.

Nelson E., Mendoza G., Regetz J., Polasky S., Tallis H., ... & Shaw M. R. Modeling Multiple Ecosystem Services, Biodiversity Conservation, Commodity Production, and Tradeoffs at Landscape Scales // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2009. Vol. 7. No 1. P. 4–11.

Palomo I., Martín-Lopez B., Potschin M., Haines-Young R., Montes C. National Parks, buffer zones and surrounding lands: Mapping ecosystem service flows // *Ecosystem Services*. 2013. Vol. 4. P. 104–116.

USGS EROS Archive — Digital Elevation — SRTM Coverage Maps / Earth resources observation and science center, USA, 2022. URL: <https://clck.ru/rKuM9> (дата обращения 15.01.2022).

REFERENCES

Alcamo J., Ash N., Bennett E., Biggs R., Butler C., ... & Zurek M., *Ecosystems and human wellbeing: a framework for assessment*, Washington, D.C., USA, Island Press., 2003, 245 p.

An overview of the Hydrology toolset, ArcGIS for Desktop, URL: <https://clck.ru/rL5FL> (2022, 17 January).

An overview of the Raster Surface toolset, ArcGIS for Desktop, URL: <https://clck.ru/rL6Ao> (2022, 25 January).

Ansink E., Hein L., Hasund K. P., To value functions or services? An analysis of ecosystem valuation approaches, *Environmental Values*, 2008, Vol. 17, No 4, pp. 489–503.

Atlas GUGK, Moscow region, 1976, <https://clck.ru/rL4yh> (2022, 15 January).

Bruno D., Sorando R., Álvarez-Farizo B., Castellano C., Céspedes V., Gallardo B., ... & Comín F. A., Depopulation impacts on ecosystem services in Mediterranean rural areas, *Ecosystem Services*, 2021, Vol. 52, Article 101369.

Bukvareva E. N., Zamolodchikov D. G., *Jekosistemnye uslugi Rossii: Prototip nacional'nogo doklada*, Vol. 1. Uslugi nazemnyh jekosistem (Ecosystem services in Russia: Prototype of the national report. Vol. 1. Services of terrestrial ecosystems), Moscow: Center for Wildlife Conservation, 2016, 148 p.

Burkhard B., Kroll F., Müller F. Windhorst W., Landscapes' Capacities to Provide Ecosystem Services — a Concept for Land-Cover Based Assessments, *Landscape Online*, 2009, No 15, pp. 1–22.

Chan K. M. A., Shaw M. R., Cameron D. R., Underwood E. C., Daily G. C., Conservation planning for ecosystem services, *PLoS Biology*, 2006, Vol. 4, No 11, 379 p.

Ecosystem processes, GreenFacts URL: <https://clck.ru/rL978> (2022, 15 May).

Ermolaev O. P., Mal'cev K. A., Muharomova S. S., Harchenko S. V., Vedenev

- va E. A., Kartograficheskaja model' rechnyh bassejnov Evropejskoj Rossii (Cartographic model of river basins of European Russia), *Geografija i prirodnye resursy*, 2017, No 2, pp. 27–36.
- Felipe-Lucia M. R., Comín F. A., Bennett E. M., Interactions among ecosystem services across land uses in a floodplain agroecosystem, *Ecology and Society*, 2014, Vol. 19, No 1, Article 20.
- Garcia-Pausas J., Casals P., Camarero L. Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: effects of climate and topography, *Biogeochemistry*. 2007, Vol. 82, No 3, pp. 279–289.
- Istomina E. A., Luzhkova N. M., Kartografirovanie jekosistemnyh uslug v Zabaikal'skom nacional'nom parke (Mapping of the ecosystem services in Zabaikalskiy National Park) *Geodezija i kartografija*, 2017, Vol. 78, No 7, pp. 59–67.
- Jenson S. K., Domingue J. O., Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, Vol. 54, No 11, pp. 1593–1600.
- Karionov Ju. I. Ocenka tochnosti matricy vysot SRTM (The estimation of the accuracy of the SRTM), *Geoprofi*, 2010, No 10, pp. 48–51.
- Kharitonova A. O., Plotnikova A. S., Ershov D. V., Sovremennye i istoricheskie pozharnye rezhimy Pechoro-Ilychskogo zapovednika i ego okrestnostej (Mapping of terrestrial ecosystems of the Pechora-Ilychsky Reserve and its surroundings), *Voprosy lesnoj nauki*, 2019, Vol. 2, No 3, pp. 1–17, DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-17.
- Kuznetsova A. I., Lukina N. V., Gornov A. V., Gornova M. V., Tikhonova E. V. ... & Genikova N. V., Zapasy ugleroda v peschanykh pochvakh sosnovykh lesov na zapade Rossii (Carbon Stock in Sandy Soils of Pine Forests in the West of Russia), *Pochvovedenie*, 2020, No 8, pp. 959–969.
- Liseckij F. N., Grigor'eva O. I., Kirilenko Zh. A., Nauchnoe soprovozhdenie bassejnovoj organizacii prirodopol'zovanija v Belgorodskoj oblasti, *Dvadcat' devjatoe plenarnoe mezhvuzovskoe koordinacionnoe soveshhanie po probleme jerozionnyh, ruslovyh i ust'evyh processov* (The identification of drainage basins borders at local spatial scale), Moscow: Mezhvuzovskij nauchno-koordinacionnyj sovet po probleme jerozionnyh, ruslovyh i ust'evyh processov pri MGU, 2014, pp. 106–107.
- Lukina N. V., Geraskina A. P., Gornov A. V., Shevchenko N. E., Kuprin A. V., ... & Gornova M. V., Bioraznoobrazie i klimatoregulirujushhie funkicii lesov: aktual'nye voprosy i perspektivy issledovanij (Biodiversity and climate regulating functions of forests: current issues and prospects for re-

- search), *Voprosy lesnoj nauki*, 2020, Vol. 3, No 4, DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90.
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being*, Washington, DC, USA: Island Press, 2005, Vol. 5, 155 p.
- Nedkov S., Boyanova K., Burkhard B., Quantifying, Modelling and Mapping Ecosystem Services in Watersheds, *Ecosystem Services and River Basin Ecohydrology*, 2015, pp. 133–149.
- Nelson E., Mendoza G., Regetz J., Polasky S., Tallis H., ... & Shaw M. R., Modeling Multiple Ecosystem Services, Biodiversity Conservation, Commodity Production, and Tradeoffs at Landscape Scales, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, Vol. 7, No 1, pp. 4–11.
- Palomo I., Martin-Lopez B., Potschin M., Haines-Young R., Montes C., National Parks, buffer zones and surrounding lands: Mapping ecosystem service flows, *Ecosystem Services*, 2013, Vol. 4, pp. 104–116.
- Plotnikova A. S., Ershov D. V., Kharitonova A. O., Ispol'zovanie GIS-tehnologij pri kartografirovanii pozharnyh rezhimov lesnyh jekosistem Pechoro-Ilychskogo zapovednika (Gis Technologies Application for Forest Fire Regimes Mapping Over Pechora Natural Reserve), *Geodezija, kartografija, geoinformatika i kadastry, Ot idei do vnedrenija*, Sbornik materi-
- alov, St. Petersburg: Politehnika, 2017, pp. 464–470.
- Plotnikova A. S., Kharitonova A. O., Vydelenie granic vodosbornyh bassejnov rek na lokal'nom prostranstvennom urovne (Identifocation of drainage basin borders at local spatial level), *Voprosy lesnoj nauki*, 2018, Vol 1, No 1, pp. 1–10, DOI: 10.31509/2658-607x-2018-1-1-1-10.
- Sharyj P. A., Geomorfometrija v naukah o Zemle i jekologii, obzor metodov i prilozhenij (Geomorphometry in Earth Sciences and ecology, review of methods and applications), *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 2006, Vol. 8, No 2, pp. 458–473.
- Smolyaninov V. M., Degtjarev S. D., Shherbinina S. V., *Jekologo-gidrologicheskaja ocenka sostojanija rechnyh vodosborov Voronezhskoj oblasti* (Ecological-hydrological assessment of the Voronezh Region River basins state), Voronezh: Istoki, 2007, 133 p.
- Soil map of the Moscow region*, 1985, <https://clck.ru/rL28X> (2022, 25 January)
- USGS EROS Archive — Digital Elevation — SRTM Coverage Maps, *Earth resources observation and science center*, USA, 2022, URL: <https://clck.ru/rKuM9> (2022, 15 January).
- Vagner B. B., Manucharjanc B. O., *Geologija, rel'ef i poleznye iskopaemye moskovskogo regiona* (Geology, relief and minerals of the Moscow region), Moscow: MPGU, 2003, pp. 50–65.

APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES TO BUILD SPATIAL PREDICTORS FOR MAPPING FOREST ECOSYSTEM FUNCTIONS AT THE LOCAL LEVEL

M. S. Savin¹, A. S. Plotnikova², A. N. Narykova²

¹*Faculty of Geography of Moscow State University*

²*Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russia*

E-mail: odm244@gmail.com

Received: 18.04.2022

Revised: 15.05.2022

Accepted: 25.05.2022

The article presents the experience of using GIS technologies to prepare predictors of regression models of carbon stocks created using the random forest machine learning method. The study was conducted on the territory of the Dankovsky district forestry, located in the south of the Moscow region. GIS analysis of spatial data containing information about the relief and hydrographic network of the study area was performed. As a result, morphometric values describing the surface runoff and altitude zonality of the study area have been created, which will be considered as predictors of carbon stock modeling. The article describes GIS tools that allow you to create thematic geospatial products: exposure, slope steepness and curvature; direction, distance and length of the flow line, total flow; average altitude above sea level and distance to the river. In addition, the boundaries of river catchment basins have been identified by means of GIS analysis, within which it is also planned to perform carbon stock modeling.

Key words: *GIS analysis, forests, climate-regulating functions and services, morphometric relief value, DEM, SRTM, OSM*

Рецензент: к. т. н. Грузинов В. С.