

УДК 528.856.044.1+528.854.2

КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БАСЕЙНОВЫХ ГЕОСИСТЕМ МАЛЫХ РЕК ВОДОСБОРА РЕКИ ЛЕНЫ

*О.П. Ермолаев, К.А. Мальцев, С.С. Мухарамова,
П.В. Хомяков, Е.А. Шынбергенов*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

Создана электронная карта бассейновых геосистем малых рек водосбора р. Лены (площадь около 2.5 млн км²). Форма представления – векторный слой полигональных объектов; пространственная детальность соответствует региональному уровню генерализации (М 1:1 000 000). Всего выделено свыше 49000 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. Реализован прототип специализированной геоинформационной системы «Речные бассейны водосбора реки Лены».

Ключевые слова: водосбор, бассейны малых рек, ЦМР, карты, ГИС

Введение

Бассейновый подход является наиболее удобным для пространственной оценки территорий суши умеренного пояса Земли, который характеризуется густой речной сетью. Однако в Российской Федерации национальная система управления природопользованием на основе бассейнового подхода находится все еще в стадии становления. Отдельные элементы этой системы были реализованы в Государственном водном реестре, в котором, в частности, отчетливо прослеживается водохозяйственная ориентированность и бассейновый принцип подразделения территории. Но вместе с тем на сегодняшний день данный реестр не предназначен для принятия управленческих решений и пока еще далек от проблем прогнозирования, оптимизации и управления природопользованием. В настоящий момент для территории России нет единой геопространственной базы данных или геоинформационной системы (ГИС), привязанной к бассейнам малых рек. Создание такой ГИС сплошного покрытия с возможностью накопления больших объемов пространственной информации о природных системах, комплексных сведений о состоянии бассейнов малых рек, изучения отклика бассейновых геосистем на антропогенное воздействие и происходящие климатические изменения в различных ландшафтных зонах является актуальной задачей современного развития российского картографирования.

Цель настоящего исследования – создание электронной карты бассейнов малых рек в водосборе реки Лены для формирования специализированной геоинформационной системы «Речные бассейны водосбора реки Лены». Выбор территории исследования определялся чрезвычайно слабой географической изученностью бассейнов малых рек этого обширного региона нашей страны и актуален в контексте планов Правительства РФ по территориальному развитию Сибири и Дальнего Востока. Создаваемая карта может служить основой для установления зависимостей формирования и функционирования малых речных систем и их водосборов от ландшафтно-географических условий территории, картографирования закономерностей стока рек и решение ряда других задач.

1. Обзор существующих моделей бассейнов рек

В настоящее время существует целый ряд электронных картографических продуктов, представляющих собой модели водосборных бассейнов (сетки бассейнов рек) того или иного территориального охвата и имеющих открытый доступ. Такие продукты могут отличаться по целевому назначению, детальности сети (характеризуемой либо средней площадью бассейнов, либо порядком потока), степени открытости данных и др. Говоря о доступных продуктах, прежде всего следует назвать HydroSHEDS, CCM, Ecrins и WBD.

Глобальным площадным охватом характеризуется база геоданных (растровых и векторных) проекта HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales) [1]. Основное содержимое этой базы – наборы слоев, представляющих собой модель речной постоянной и временной гидросети (линий тока), и наборы слоев HydroBASINS, содержащих модель водосборов, рассчитанных для устьевых точек сети рек. Обе модели строились на основе модели рельефа SRTM (разрешение 3"), а затем полученная геометрия была генерализована до детальности, соответствующей разрешению 15" и 30" на пиксель. Такой подход потребовал от авторов привлечения значительных временных и вычислительных ресурсов, однако позволил сохранить структуру топографической поверхности – плановое положение и форму водоразделов, тальвегов, положение их узловых точек. HydroBASINS наследует все ограничения, которые присущи исходной модели рельефа, что обуславливает существенные ошибки трассировки водоразделов на выровненных, а также на залесенных и урбанизированных территориях. Кроме того, значительные неточности могут иметь границы бассейнов рек с хорошо выраженной дельтой, а также рек, на которых находятся крупные дамбы и мосты. При этом более качественные данные сосредоточены в полосе широт покрытия SRTM (до 60° с.ш.), за пределами этой полосы водосборы описывались на основе модели рельефа более грубого масштаба (GTOPO30) [2]. Бассейны выделялись для узловых точек системы тальвегов только в том случае, если для данной точки площадь водосбора была не менее 100 км². Эта величина выбрана с большой долей условности, поскольку такой единый подход к минимальной размерности бассейнов для разных ландшафтно-климатических условий ошибочен. А для территорий, простирающихся севернее 60°-ной параллели, вообще вряд ли подходит. Здесь, в таежной зоне, увеличивается густота речного расчленения, и, соответственно, уменьшается размер бассейнов первого порядка. Так, по нашим

данным, в выборке из 500 бассейнов площади речных бассейнов в степной зоне Европейской России в среднем составляют 111 км², а в подзоне средней тайги сокращаются более чем на 25%, до 84 км². Модель HydroBASINS, являясь глобальной, представляет и модели малых бассейнов водосбора р. Лены. Отметим, что HydroBASINS включает бассейны как постоянных (реки), так и временных водотоков без их разделения.

Для территории Европы в 2003 г. была создана первая версия базы геоданных ССМ (Catchment Characterization and Modeling), последняя версия которой, ССМ v.2.1, включает модель водосборов, построенную по ЦМР с разрешением 100 м [3, 4]. Несомненное достоинство ССМ (в сравнении с HydroSHEDS) – попытка учесть значительные различия геологических и ландшафтно-климатических условий на изучаемой территории, в том числе внести поправку в минимальную пороговую площадь выделяемых бассейнов [5]. Покрытие модели водосборов ССМ – вся Европа, соответственно, бассейн р. Лены на ней не представлен.

Широко известной гидрографической базой геоданных (включающей в себя и границы речных бассейнов) является ECRINS (European catchments and rivers network system). Данная база геоданных создавалась на основе базы ССМ v. 2.1, поэтому геометрия границ водосборов Ecrins соответствует модели ССМ v. 2.1. В то же время в базе ECRINS представлены более крупные бассейны, полученные за счет агрегирования бассейнов модели ССМ v. 2.1. Различаются также подходы к наполнению атрибутивной информацией двух баз данных. Ареал покрытия этого набора данных соответствует ареалу покрытия ССМ, и, следовательно, он также не содержит информации о границах бассейнов рек водосбора Лены.

Набор гидрографических данных WBD (Watershed Boundary Dataset) также не охватывает интересующую нас территорию. В отличие от ранее описанных, он построен по топографическим картам: для основной части территории США по картам М 1:24 000; для территории Аляски – М 1:63 360 и для Карибских островов – М 1:25 000 [6].

Проведенный обзор существующих зарубежных и отечественных моделей бассейнов рек показал отсутствие в настоящее время электронных карт (регионального уровня генерализации) малых речных бассейнов, составляющих бассейн р. Лены.

2. Объект и методы исследования

Водосборный бассейн р. Лены расположен большей частью в пределах Республики Саха (Якутии). Площадь водосбора составляет порядка 2420 тыс. км². По площади водосбора р. Лены занимает 8-е место среди великих рек Земли, а в России – 3-е (сразу за Обью с Иртышом и Енисеем).

Объектом исследования выступают бассейны малых рек водосбора р. Лены. Предмет исследования – создание электронной карты малых речных бассейнов средствами ГИС-технологий. В работе принят региональный уровень пространственной детальности, соответствующий картографическому масштабу 1:1000 000. Для территории исследования была построена 100-километровая буферная зона с тем, чтобы избежать граничных эффектов при проведении пространственного анализа и моделирования.

Построение границ речных бассейнов для обширных территорий может быть выполнено с применением автоматизированных методик, реализованных во многих ГИС-пакетах (ArcGIS, QGIS, GRASS, SAGA, Whitebox GAT). Все эти инструменты требуют наличия в качестве исходных данных: ЦМР заданной пространственной детальности и карты рек соответствующего масштаба. В 2015–2016 гг. в рамках проекта Российского научного фонда «География и геоэкология рек и речных бассейнов Европейской части России: пространственный анализ, оценка и моделирование» (№ 15-17-10008) была разработана методика автоматизированного выделения границ речных бассейнов по глобальным ЦМР. Именно с ее использованием создана электронная карта бассейнов рек и межприточных пространств на Европейскую часть нашей страны [7]. Эта же методика отрабатывалась нами и при создании карты бассейнов рек водосбора р. Лены.

3. Создание картографической модели бассейнов малых рек для водосбора реки Лены

Процесс создания картографической модели бассейнов как электронного векторного слоя границ бассейнов можно разделить на следующие основные этапы: 1) подбор исходных данных; 2) подготовка модели рельефа; 3) построение границ бассейнов в автоматическом режиме по подготовленной модели рельефа.

3.1. Подбор исходной ЦМР. На первом этапе нами были рассмотрены глобальные модели рельефа, имеющие открытый доступ. В настоящее время рельеф исследуемой территории представлен несколькими такими моделями: GTOPO30 (пространственное разрешение 30 угл. с/~ 1000 м; глобальное покрытие [8]); GMTED2010 (пространственное разрешение 7.5 угл. с /~ 250 м, 15 угл. с/~ 500 м, 30 угл. с/~ 1000 м; пространственное покрытие 84° с.ш. – 56° ю. ш. [9]); SRTM (пространственное разрешение 1 угл. с/~ 30 м, 3 угл. с/~ 90 м; пространственное покрытие 60° с.ш. – 56° ю.ш. [10, 11]); Aster GDEM (пространственное разрешение 1 угл. с/~ 30 м; пространственное покрытие 83° с.ш. – 83° ю.ш. [12]); AW3D30 DSM v. 1.1 – ALOS World 3D-30m (пространственное разрешение 1 угл. с/~ 30 м; пространственное покрытие 82° с.ш. – 82° ю.ш.). Все эти модели используют для геопозиционирования международную систему координат WGS-84, источник данных – архив Геологической службы США. Существуют и другие модели рельефа глобального охвата, однако они распространяются на коммерческой основе и в нашей работе не рассматриваются [13].

Самой высокой горизонтальной детальностью для исследуемой территории обладала бы модель рельефа, скомбинированная на основе глобальных моделей рельефа, имеющих горизонтальное разрешение 30 м. Однако, учитывая размеры бассейна р. Лены и принятый в исследовании уровень генерализации, при котором пространственное разрешение составляет 250–500 м, такая пространственная детальность (30 м) становится избыточной и не соответствует картографическому принципу сомасштабности. Поэтому оптимальной для достижения цели наших исследований является модель GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010) [9]. Конечные продукты данной ЦМР доступны с тремя пространственными разрешениями: 250, 500 и 1000 м. При этом для

каждого разрешения существует несколько вариантов моделей GMTED2010, которые различаются алгоритмами обработки исходных данных. Нами была выбрана модель, имеющая разрешение 250 м и полученная с использованием алгоритма обработки *breakline emphasis*. Этот вариант обработки сохраняет на результирующей модели положение тальвегов временной и постоянной гидро-сети, построенных по данным исходного разрешения [13].

Для выбора подходящей для нашего уровня генерализации электронной карты рек были рассмотрены источники открытой информации о гидрографической сети (VMap0, OpenStreetMap, ССМ 2.1, Ecrins, HydroSheds), имеющие разное покрытие и детальность. В качестве исходной карты гидросети была выбрана векторная карта водных объектов РФ масштаба 1:1 000 000, а именно слой водных объектов, представленных полигонами, и слой водных объектов, представленных полилиниями в масштабе карты.

3.2. Подготовка модели рельефа. На втором этапе выполнялась предварительная обработка (подготовка) модели рельефа. Подготовка модели преследует такие цели, как создание единой мозаики из набора фрагментов ЦМР с передискретизацией на рабочий растр и перепроецированием в рабочую проекцию; задание соответствия между моделью рельефа и используемой картой гидросети; устранение локальных «западин», присутствующих в исходной модели [13, 14].

Модель GMTED2010 распространяется фрагментами. Нами использовано четыре фрагмента, которые были «сшиты» в единую мозаику, передискретизированы на рабочий растр и перепроецированы в целевую проекцию. Для геопозиционирования была выбрана система координат конической равноплощадной (равновеликой) проекции Альберса (Albers Equal-Area Conic). Шаг растровой сетки, используемой для представления исходных данных, проведения модельных расчетов и представления результатов, составляет 250×250 м, а общее количество обрабатываемых ячеек в пределах границ водосбора р. Лены около 40 млн.

Полученная ЦМР корректировалась с использованием карты гидрографической сети территории. Предварительно векторные слои гидросети были переведены в рабочий растр. Коррекция проводилась в соответствии с авторской методикой [15, 16], несколько доработанной в ходе исследования. Суть этой методики состоит в следующем: модель рельефа корректируется таким образом, чтобы значения отметок высот в ячейках регулярной сетки, относящихся к водным объектам, монотонно убывали от истока к устью. На следующем этапе подготовки модели рельефа устранялись локальные «западины», то есть области замкнутых депрессий на территориях, не относящихся к водным объектам. Эта операция выполнялась по известной методике, описанной как в отечественной [17], так и в зарубежной [18] литературе.

3.3. Построение границ бассейнов в автоматическом режиме. На третьем этапе на основе скорректированной модели рельефа и растровой модели гидрографической сети построены границы бассейнов рек для всей территории исследования. Границы выделялись в автоматическом режиме по алгоритму, реализованному в программе Whitebox GAT [19]. На данном этапе решался ряд технологических задач, связанных с большим объемом обрабатываемых массивов данных.

Для оценки качества получаемого результата предварительно выполнялась серия тестовых расчетов на участках с различными условиями рельефа: в пределах низменных равнин и болотистой местности, в пределах возвышенного и горного рельефа. Особое внимание уделялось точности выделения границ бассейнов, анализировались ошибки – артефакты автоматического выделения. При этом проверялось соответствие границ бассейнов, выделенных в автоматическом режиме по подготовленной ЦМР и экспертно по топографической карте М 1:200 000. Оценивались совпадение площадных характеристик и «правильность» геометрии границ. Средняя разница площадей бассейнов, выделенных на тестовых участках автоматически и экспертно, составила около 5%, что является приемлемой ошибкой, если считать экспертный «ручной» метод безошибочным.

Выделение бассейнов водосбора р. Лены проведено планарно, то есть выделялись не только бассейны малых рек (в принятом масштабе это были водотоки первого порядка), но и их межбассейновые (или межприточные) пространства. Результат построения границ бассейнов по ЦМР в автоматическом режиме представлен в виде векторного слоя полигональных объектов (бассейнов рек и межприточных пространств). Отдельно дорабатывались широкие пойменные участки с большим количеством старичных озер. Здесь границы бассейнов картографировались (векторизовались) вручную с использованием космических снимков высокого разрешения из открытых источников (Google Earth, SAS.Планета) [20]. Всего на результирующем слое представлено 49570 бассейнов рек и межприточных пространств.

4. Создание геоинформационной базы данных на бассейны рек

Полученная карта границ речных бассейнов (ее фрагмент показан на рис. 1) является основой для создания базы геоданных специализированной геоинформационной системы «Речные бассейны водосбора реки Лены». Для информационного наполнения ГИС были рассмотрены различные источники геоданных:

– тематические картографические материалы, соответствующие уровню пространственной детальности исследований и опубликованные в разное время на данную территорию;

– цифровые тематические материалы, в частности продукты, полученные по результатам обработки ДДЗЗ нужной пространственной детальности.

При этом рассматривались как данные, имеющиеся в открытом доступе, так и данные, предоставляемые на коммерческой основе. В результате анализа качества доступных материалов в ГИС были включены тематические геоданные, характеризующие природно-ресурсный потенциал в бассейнах.

4.1. Геоморфометрия рельефа. В первую очередь на основе используемой модели рельефа GMTED2010 рассчитаны производные слои морфометрических характеристик рельефа исследуемой территории: крутизна склонов, экспозиция склонов, эрозионный потенциал рельефа, длины линий тока, профильная и плановая кривизны, порядок водотоков. Для минимизации искажений при вычислениях морфометрических показателей использовалась равнопромежуточная проекция. Крутизна (угол наклона), экспозиция, кривизны, длины линий тока были рассчитаны с использованием программного комплекса ARCGIS,

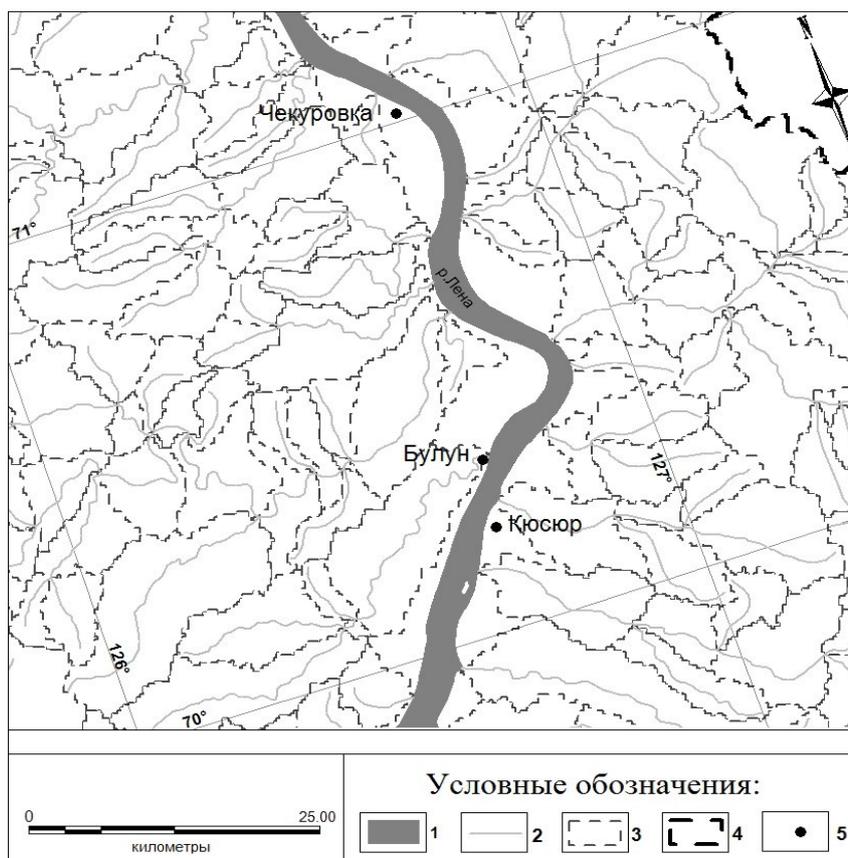


Рис. 1. Карта речных бассейнов (фрагмент) водосбора р. Лены: 1 – русло р. Лены; 2 – речная сеть; 3 – границы бассейнов; 4 – водораздел р. Лены; 5 – населенные пункты

где для расчетов применяются методики [21, 22]. При этом, прежде чем рассчитывать длины линий тока, модель рельефа обрабатывалась для устранения локальных западин. Эрозионный потенциал рельефа и порядок водотоков рассчитывались в программном комплексе WhiteBox GAT. При построении модели порядков водотоков использована классическая схема Философова – Стралера. Далее выполнялось обобщение морфометрических характеристик рельефа на операционно-территориальные единицы анализа – речные бассейны. Для каждого бассейна определены средняя, минимальная и максимальная высота, размах высот, средние значения крутизны склонов, экспозиции, эрозионного потенциала рельефа, длин линий тока.

4.2. Климат. Для определения климатических показателей использованы данные метеостанций Росгидромета - открытые данные ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (Мировой центр данных): координаты метеорологических станций [23]; температура воздуха и количество осадков [24]. На основе данных многолетних ежедневных наблюдений на каждой метеостанции были рассчитаны значения 16 климатических показателей: средняя годовая температура воздуха, средняя температура воздуха в январе, средняя температура воздуха в июле, среднее многолетнее абсолютных максимумов температуры за год, среднее многолетнее

абсолютных минимумов температуры за год, среднегодовая амплитуда температуры воздуха, среднее квадратическое отклонение температуры воздуха за год, среднее многолетнее число дней с температурой воздуха ниже +8 °С, повторяемость сильных морозов (–30 °С и ниже), сумма активных температур, среднее годовое количество осадков, среднее количество осадков в мае – августе, среднее количество осадков за холодный период года, среднее количество осадков за теплый период года, коэффициент вариации годового количества осадков, гидротермический коэффициент. После чего выполнена пространственная интерполяция 16 климатических показателей на всю территорию исследования (с использованием метода пространственной интерполяции Multilevel B-spline Approximation) и обобщение этих показателей на бассейны рек.

4.3. Типы земного покрова. Источником информации о типах земного покрова территории водосбора реки Лены послужила база геоданных, подготовленная на основе серии карт наземных экосистем России TerraNorte RLC, разработанных в Институте космических исследований РАН [25]. Основным источником первичной информации – данные спутниковых наблюдений с помощью спектрорадиометра MODIS со спутника Terra (продукт MOD09). Распознавание типов земного покрова выполнено по их спектрально-отражательным характеристикам на основе контролируемой локально-адаптивной классификации спутниковых изображений, а также с использованием специально разработанных методов обработки спутниковых данных, анализирующих многолетние признаки распознавания. Распознаваемые типы земного покрова включают классы растительного покрова (темнохвойные вечнозеленые, светлохвойные вечнозеленые, лиственные, хвойные листопадные (лиственничные) леса, хвойные вечнозеленые кустарники, болота, луга, лиственные кустарники, смешанные леса с преобладанием хвойных, смешанные леса, смешанные леса с преобладанием лиственных, степи, прибрежная растительность, кустарничковая тундра, травянистая тундра, кустарниковая тундра, редины хвойные листопадные (лиственничные), а также открытые грунты и выходы горных пород, реки и водоемы, свежие гари, урбанизированные территории, вечные снега и льды, регулярно возделываемые пахотные земли [26]. С использованием этой информации для каждого бассейна исследуемой территории рассчитаны проценты площади бассейна, занятой лесом, лугом, кустарниками, болотами, пашней.

4.4. Почвы и ландшафты. В прототип ГИС «Речные бассейны водосбора реки Лены» были включены покрытия на исследуемую территорию электронных почвенной и ландшафтной карт.

Электронная почвенная карта России разработана в Почвенном институте им. В.В. Докучаева и доступна как Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [27–30]. Полигональные объекты слоя представляют собой оцифрованные контуры почвенной карты РСФСР масштаба 1:2500 000 [31]. В каждом полигоне содержится информация о почвенном покрове и почвообразующих породах. Легенда цифровой карты включает 205 почвенных разностей, 70 комплексов почв, 6 непочвенных образований, 30 вариантов гранулометрического и петрографического состава почвообразующих пород.

Электронная ландшафтная карта СССР доступна по ссылке [32] на сайте International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Это цифровая версия ландшафтной карты СССР масштаба 1:2500 000 [33]. В качестве атрибутов ландшафтных выделов даны отдел, группа, класс, тип, подтип, род, варианты рода, вид ландшафта. Надо отметить, что указанная в описании карты система координат не позволяет получить точного геопозиционирования (невязка порядка 15 км). Нами было проведено уточнение геопривязки цифровой карты, подобраны параметры проекции, обеспечивающие ее пространственной совмещение с остальной геоинформацией.

4.5. Обобщение геоданных на бассейны рек. Далее выполнялось обобщение всей включенной в ГИС тематической информации на операционно-территориальные единицы анализа – речные бассейны. Для каждого бассейна определены обобщенные морфометрические характеристики рельефа, а также усредненные климатические показатели. С использованием информации базы геоданных типов земного покрова для каждого бассейна исследуемой территории рассчитаны проценты площади бассейна, занятой лесом, лугом, кустарниками, болотами, пашней. На основе почвенной и ландшафтной карт для каждого речного бассейна в пределах водосбора реки Лены были определены преобладающие тип почвы и тип почвообразующей породы, тип и подтип ландшафта.

Все операции обработки и анализа геоданных (пространственная интерполяция, обобщение на бассейны рек информации с тематических растровых и векторных слоев) выполнялись с помощью программ, написанных на языке R (пакеты *rgdal*, *raster*, *MBA*) [34–40], и с помощью разработанных SQL-запросов в СУБД *PostgreSQL/PostGIS* [41].

В результате атрибутика объектов слоя бассейновых геосистем малых рек включает следующую тематическую информацию.

Морфометрические характеристики рельефа в бассейне:

- площадь бассейна, км²;
- средняя высота в бассейне, м;
- минимальная высота в бассейне, м;
- максимальная высота в бассейне, м;
- разброс высот в бассейне, м;
- средняя крутизна склонов в бассейне, град.;
- средняя экспозиция склонов в бассейне (от «холодных» –1 к «теплым» 1);
- эрозионный потенциал рельефа в бассейне;
- длины линий тока в бассейне, м.

Климатические характеристики:

- средняя годовая температура воздуха в бассейне, °С;
- средняя температура воздуха в январе, °С;
- средняя температура воздуха в июле, °С;
- среднее многолетнее абсолютных максимумов температуры за год, °С;
- среднее многолетнее абсолютных минимумов температуры за год, °С;
- среднегодовая амплитуда температуры, °С;

Табл. 1

Основные статистические оценки морфометрических параметров рельефа в бассейнах

Параметры	Минимальная	Максимальная	Средняя	СКО
Площадь, км ²	0.25	2604.25	47.8	3531.1
Средняя высота, м	0	2289.6	604.9	151107.1
Высота минимальная, м	0	1723	443.7	88196.1
Высота максимальная, м	0	2981	831.1	302516.7
Глубина расчленения, м	0	2426	387.4	111985.9
Средний уклон, град.	0	31.5	5.7	25.5
Эрозионный потенциал рельефа	0	855.3	11.6	354.3

- среднее квадратическое отклонение температуры воздуха за год, °С;
- среднее многолетнее число дней с температурой ниже +8 °С;
- повторяемость (в %) сильных морозов;
- сумма активных температур, °С;
- среднее годовое количество осадков в бассейне, 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 в бассейне.

Земной покров в бассейне:

- лесистость бассейна, %;
- распаханность бассейна, %;
- залуженность бассейна, %;
- кустарники в бассейне, %;
- заболоченность бассейна, %.

Почвы в бассейне:

- преобладающий тип почвы.
- преобладающий тип почвообразующей породы.

Ландшафты:

- тип ландшафта;
- подтип ландшафта.

Полученная карта малых речных бассейнов и созданная для них база данных, реализованные в рамках прототипа ГИС «Речные бассейны водосбора реки Лены», позволяют изучать особенности формирования и функционирования бассейновых геосистем в ландшафтно-географических условиях этой части России, проводить тематическое и комплексное картографирование бассейнов с достаточно высокой степенью пространственной детальности.

В качестве примеров приведем рассчитанные основные статистические оценки морфометрических характеристик рельефа в бассейнах (табл. 1). Можно видеть, что площади бассейнов сильно колеблются (среднеквадратичное отклонение 3531.1). Минимальная площадь составляет 0.25 км², максимальная – 2604.25 км²,

Табл. 2

Распределение бассейнов по площади водосборов

Площади водосборов, км ²	Количество бассейнов, шт.	Доля от общего количества, %	Доля от общей площади водосбора р. Лены, %
< 50	32820	66.21	28.50
50–100	11215	22.62	33.14
100–150	3459	6.98	17.58
150–200	1106	2.23	8.02
200–400	832	1.68	9.01
400–600	81	0.16	1.64
600–1000	46	0.10	1.47
> 1000	11	0.02	0.64

Табл. 3

Распределение бассейнов по средним уклонам

Средний уклон, град.	Типизация	Количество бассейнов, шт.	Доля от общего количества, %	Доля от общей площади водосбора р. Лены, %
< 1	Слабополгие	4299	8.7	6
1–2	Полгие	8990	18.1	21.3
2–5	Покатые	14937	30.1	32.7
5–9	Покато-крутые	9991	20.2	19.4
9–20	Крутые	10589	21.4	19.4
20–30	Очень крутые	761	1.5	1.1
30–45	Чрезвычайно крутые	3	0 (0.006)	0 (0.001)

средняя – 47.8 км², почти 96% бассейнов имеют площади до 150 км² (табл. 2). В табл. 3 приведено распределение бассейнов по значениям средней крутизны склонов, а на рис. 2 в виде тематической карты показаны пространственные особенности этого распределения.

Приведенные статистические данные носят справочный характер и в дальнейшем могут быть использованы для специальных расчетов, например для оценки потенциального смыва почв, стока рек, геоморфологического районирования территории и др.

Заключение

В результате проведенных исследований впервые для такой обширной территории России, как водосбор р. Лены (площадь около 2.5 млн км²), создана электронная карта бассейновых геосистем малых рек, соответствующая региональному уровню генерализации (М 1:1000 000). Карта представлена векторным слоем полигональных объектов (бассейнов рек и межприточных пространств). Всего на карте выделено 49570 объектов со средней площадью около 47.8 км².

Методика построения карты бассейновых геосистем водосбора р. Лены описывает:

- выбор базовой ЦМР и карты гидросети, соответствующих пространственной детальности исследований;

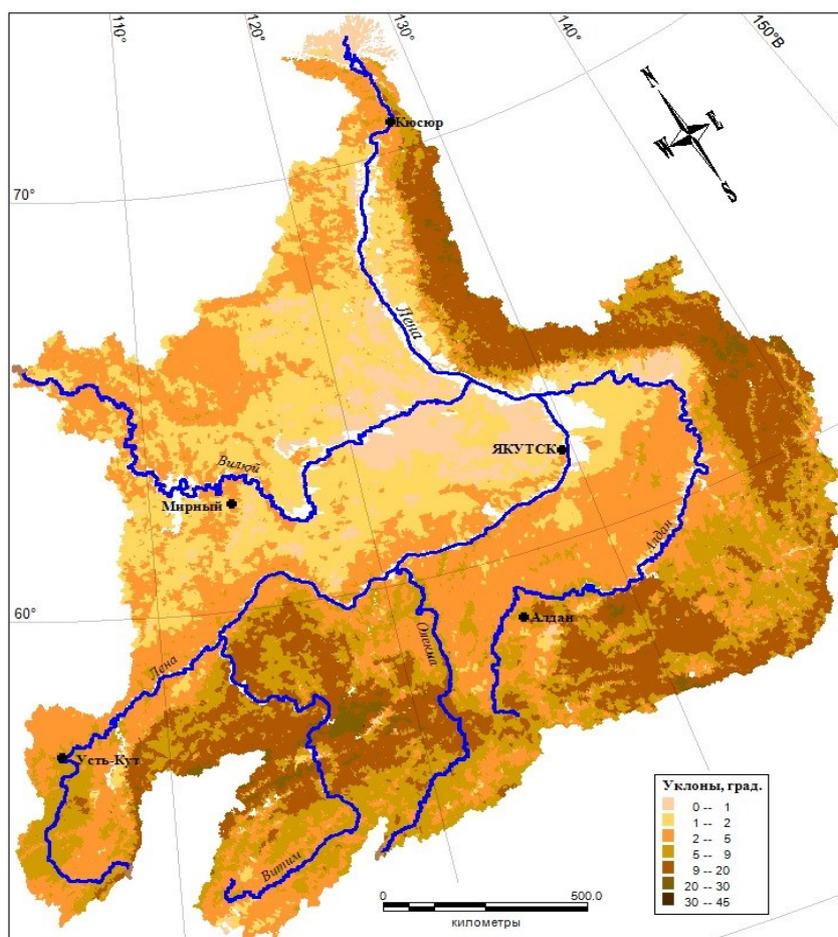


Рис. 2. Карта средних уклонов бассейнов малых рек водосбора р. Лены

- выбор геометрических параметров раstra для представления исходных данных, модельных расчетов и результатов;
- предварительную обработку исходных данных; коррекцию ЦМР с использованием карты гидросети;
- построение границ водосборных бассейнов на всю территорию исследования в автоматическом режиме;
- оценку точности построения границ речных бассейнов по ЦМР для основных типов рельефа.

Реализован прототип специализированной геоинформационной системы «Речные бассейны водосбора реки Лены». В ГИС интегрирована геоинформация, включающая следующие сомасштабные с выбранным уровнем генерализации векторные и растровые картографические слои: речные бассейны; модель рельефа и его геоморфометрические характеристики; почвенная карта и ландшафтная карты; климатические параметры; типы земного покрова; слои общегеографического содержания (топооснова); граница территории исследования. Атрибутика объектов слоя речных бассейнов включает разнообразную тематическую информацию, предоставляя сведения о географии и геоэкологии речных

бассейнов водосбора р. Лены. Состав слоев данной ГИС, так же как и характеристики бассейнов, может пополняться по результатам дальнейших исследований.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-17-10008), также за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. *Lehner B., Verdin K., Jarvis A.* New global hydrography derived from spaceborne elevation data // *Eos, Trans., Am. Geophys. Union.* – 2008. – V. 89, No 10. – P. 93–94. – doi: 10.1029/2008EO100001.
2. *Lehner B.* HydroBASINS. Global watershed boundaries and sub-basin delineations derived from HydroSHEDS data at 15 second resolution: Technical Documentation Version 1.c (with and without inserted lakes). – 2014. – URL: http://hydrosheds.org/images/inpages/HydroBASINS_TechDoc_v1c.pdf, свободный.
3. *Vogt J.V., Colombo R., Paracchini M.L., de Jager A., Soille P.* CCM River and Catchment Database, Version 1.0: Report EUR 20756 EN. – Ispra: Eur. Comm., Jt. Res. Cent., 2003. – 32 p. – URL: <http://agrienv.jrc.ec.europa.eu/publications/pdfs/CCM1-Report-EUR20756EN-2003.pdf>, свободный.
4. *Vogt J.V., Soille P., Jager A. de, Rimavi E., Mehl W., Foisneau S., Bódis K., Dusart J., Paracchini M.L., Haastrup P., Bamps C.* A pan-European River and Catchment Database: Report EUR 22920 EN. – Ispra: European Commission, Joint Research Centre, 2007. – 124 p. – URL: http://ccm.jrc.ec.europa.eu/documents/CCM2-Report_EUR-22920-EN_2007_STD.pdf, свободный.
5. *Vogt J.V., Colombo R., Bertolo F.* Deriving drainage networks and catchment boundaries: A new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics // *Geomorphology.* – 2003. – V. 53, No 3–4. – P. 281–298. – doi: 10.1016/S0169-555X(02)00319-7.
6. Federal Standards and Procedures for the National Watershed Boundary Dataset (WBD) (4th ed.): Techniques and Methods 11–A3. – U.S. Geological Survey and U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2013. – 63 p. – URL: <http://pubs.usgs.gov/tm/11/a3/>, свободный.
7. *Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A.* Cartographic model of river basins of European Russia // *Geogr. Nat. Res.* – 2017. – V. 38, No 2. – P. 131–138. – doi: 10.1134/S1875372817020032.
8. *Gesch D.B., Oimoen M.J., Evans G.A.* Accuracy assessment of the U.S. Geological Survey National Elevation Dataset, and comparison with other large-area elevation datasets – SRTM and ASTER // U.S. Geological Survey Open-File Report 2014–1008. – 2014. – 10 p. – doi: 10.3133/ofr20141008.
9. *Danielson J.J., Gesch D.B.* Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): Open-File Report 2011–1073. – Reston: U.S. Geol. Surv., 2011. – 34 p. – URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2011/1073/pdf/of2011-1073.pdf>, свободный.
10. *Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D.* The Shuttle Radar Topography Mission // *Rev. Geophys.* – 2007. – V. 45, No 2. – P. 1–33. – doi: /10.1029/2005RG000183.

11. *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. – URL: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf, свободный.
12. Общее описание Aster GDEM. – URL: <http://gis-lab.info/qa/aster-gdem.html>, свободный.
13. *Gesch D.B.* The effects of DEM generalization methods on derived hydrologic features // Spatial accuracy assessment: Land information uncertainty in natural resource. – Chelsea, MI: CRC Press, 1999. – P. 255–262.
14. *Danielson J.J., Gesch D.B.* An enhanced global elevation model generalized from multiple higher resolution source datasets // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., Beijing. – 2008. – V. XXXVII, Pt. B4. – P. 1857–1863.
15. *Мальцев К.А., Ермолаев О.П.* Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного построения границ водосборов // Геоморфология. – 2014. – № 1. – С. 45–53.
16. *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.
17. *Погорелов А.В., Думит Ж.А.* Рельеф бассейна р. Кубани: морфологический анализ. – М.: ГЕОС, 2009. – 218 с.
18. *O'Callaghan J., Mark D.M.* The extraction of drainage networks from digital elevation data // Comput. Vision Graphics Image Process. – 1984. – V. 28, No 3. – P. 323–344. – doi: 10.1016/S0734-189X(84)80011-0.
19. *Lindsay J.B.* The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS // Proc. GIS Research, UK 22nd Annu. Conf. – Glasgow, UK: Univ. of Glasgow, 2014. – P. 16–18.
20. *Шынбергенев Е.А.* Идентификация пойм крупных рек Сибири (Обь, Енисей, Лена) по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса // Трешниковские чтения – 2017: Современная географическая картина мира и технологии географического образования: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Ульяновск: ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова», 2017. – С. 304–305.
21. *Burrough, P.A., McDonell, R.A.* Principles of Geographical Information Systems. – N. Y.: Oxford Univ. Press, 1998. – 190 p.
22. *Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R.* Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications // Hydrol. Processes. – 1991. – V. 5, No 1. – P. 3–30. – doi: 10.1002/hyp.3360050103.
23. Координаты метеорологических станций // Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой Центр Данных (ВНИИГМИ-МЦД). Федеральный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – URL: <http://meteo.ru/data/155-meteostations>, свободный.
24. Температура воздуха и количество осадков (ежедневные данные) // Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой Центр Данных (ВНИИГМИ-МЦД). Федеральный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>, свободный.
25. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лулян 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
26. *Барталев С.А., Егоров В.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лулян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по

- данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 4. – С. 285–302.
27. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхоз-академии, 2014. – 768 с.
 28. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Интернет-ресурс официальной поддержки ЕГРПП. – URL: <http://egrpg.esoil.ru/index.php>, свободный.
 29. Рухович Д.И., Вагнер В.Б., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В., Королева П.В. Проблемы использования цифровых тематических карт на территорию СССР при создании ГИС «Почвы России» // Почвоведение. – 2011. – № 9. – С. 1043–1055.
 30. Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Симакова М.С., Долинина Е.А., Рухович С.В. Государственная почвенная карта – версия ArcInfo // Почвоведение. – 2013. – № 3. – С. 251–267. – doi: 10.7868/S0032180X13030088.
 31. Почвенная карта РСФСР (оцифрованный оригинал одноименной почвенной карты). Масштаб 1: 2500 000 / Под ред. В.М. Фридланда. – М.: ГУГК, 1988.
 32. Леса и лесное хозяйство России. Данные и анализ. Ландшафты. – URL: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/russian/for_cond_ru.html#landscapes, свободный.
 33. Ландшафтная карта СССР. Масштаб: 1:2500 000 / Под ред. И.С. Гудилина. – М.: ГУГК, 1987. – 14 л.
 34. Lee S., Wolberg G., Shin S.Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines // IEEE Trans. Visualization Comput. Graphics. – 1997. – V. 3, No 3. – P. 228–244. – doi: 10.1109/2945.620490.
 35. Finley A., Banerjee S., Hjelle Ø., Bivand R. MBA: Multilevel B-spline Approximation. R package version 0.0-9. – 2017. – URL: <http://CRAN.R-project.org/package=MBA/>.
 36. Wood S.N. Thin-plate regression splines // J. R. Stat. Soc. B. – 2003. – V. 65, No 1. – P. 95–114. – doi: 10.1111/1467-9868.00374.
 37. Wood S.N. Generalized Additive Models: An Introduction with R. – Chapman and Hall/CRC, 2006. – 476 p.
 38. Hijmans R.J., van Etten J., Cheng J., Mattiuzzi M., Sumner M., Greenberg J.A., Lamigueiro O.P., Bevan A., Racine E.B., Shortridge A., Ghosh A. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.6-7. – 2017. – URL: <http://CRAN.R-project.org/package=raster/>.
 39. Bivand R., Keitt T., Rowlingson B., Pebesma E., Sumner M., Hijmans R., Rouault E., Warmerdam F., Ooms J., Rundel C. rgdal: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library. R package version 1.2-18. – 2018. – URL: <http://CRAN.R-project.org/package=rgdal/>.
 40. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. – R Foundation for Statistical Computing. – Vienna, Austria, 2014. – URL: <http://www.R-project.org/>.
 41. PostgreSQL. – URL: <https://www.postgresql.org/>.

Поступила в редакцию
24.05.17

Ермолаев Олег Петрович, доктор географических наук, профессор кафедры ландшафтной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: oyermol@gmail.com

Мальцев Кирилл Александрович, кандидат географических наук, доцент кафедры ландшафтной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *mlcvkirill@rambler.ru*

Мухарамова Светлана Саясовна, кандидат биологических наук, доцент кафедры моделирования экосистем

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *mss@kpfu.ru*

Хомяков Петр Валерьевич, инженер I категорий кафедры ландшафтной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *p.hamster21@gmail.com*

Шынбергенов Ерлан Алимжанович, аспирант кафедры ландшафтной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *shynbergenov.erlan@mail.ru*

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2018, vol. 160, no. 1, pp. 126–144

The Cartographic Model of Basin Geosystems of Small Rivers of the Lena River Catchment Area

O.P. Yermolaev^{*}, *K.A. Malcev*^{**}, *S.S. Mukharamova*^{***}, *P.V. Khomyakov*^{****},
Y.A. Shynbergenov^{*****}

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

E-mail: ^{*}*oyermol@gmail.com*, ^{**}*mlcvkirill@rambler.ru*, ^{***}*mss@kpfu.ru*,
^{****}*p.hamster21@gmail.com*, ^{*****}*shynbergenov.erlan@mail.ru*

Received May 24, 2017

Abstract

The analysis of the available foreign and Russian models of river basins has demonstrated that there are no such successful regional generalizations for the territory under study. For the Asian part of the Arctic catchment basin of Russia occupying an area of about 2.5 million km², a digital map of basin geosystems of small rivers of the Lena River catchment area (scale 1:1000 000) has been created. The map is a vector layer of polygonal objects. The verification of the obtained results provides evidence of the satisfactory quality of the construction of boundaries of small river basins in automatic mode (the standard error for various landscape conditions makes 7–8.5%). A total of 49570 objects (basins) with an average area of about 47.8 km² have been allocated on this map. The methodology used for constructing the basins on the map includes: selection of basic DEM and river network map; selection of geometric parameters for regular raster grid to present initial data, perform model calculations, and display results; correction of DEM using river network map; construction of boundaries of catchments in automatic mode; elaboration of a vector layer of polygonal objects; assessment of watersheds modelling accuracy for different types of landscape. The specialized Geographic Information System “River basins of the Lena River Catchment Area” has been implemented. Geoinformation about natural and anthropogenic characteristics of the river basins has been integrated in GIS.

Keywords: catchment area, small river basins, DEM, maps, GIS

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 15-17-10008) and performed according to the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University.

Figure Captions

Fig. 1. The map of river basins (a fragment) of the Lena River catchment area: 1 – Lena River bed; 2 – river network; 3 – basin boundaries; 4 – Lena River watershed area; 5 – human settlements.

Fig. 2. The map showing average slopes of the basins of small rivers of the Lena River catchment area.

References

1. Lehner B., Verdin K., Jarvis A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Trans., Am. Geophys. Union*, 2008, vol. 89, no. 10, pp. 93–94. doi: 10.1029/2008EO100001.
2. Lehner B. HydroBASINS. Global watershed boundaries and sub-basin delineations derived from HydroSHEDS data at 15 second resolution. Technical Documentation Version 1.c (with and without inserted lakes). Available at: http://hydrosheds.org/images/inpages/HydroBASINS_TechDoc_v1c.pdf.
3. Vogt J.V., Colombo R., Paracchini M.L., de Jager A., Soille P. CCM River and Catchment Database, Version 1.0. In: *Report EUR 20756 EN*. Ispra, Eur. Comm., Jt. Res. Cent., 2003. 32 p. Available at: <http://agrienv.jrc.ec.europa.eu/publications/pdfs/CCM1-Report-EUR20756EN-2003.pdf>.
4. Vogt J. V., Soille P., Jager A. de, Rimavi E., Mehl W., Foisneau S., Bódis K., Dusart J., Paracchini M.L., Hastrup P., Bamps C. A pan-European River and Catchment Database. In: *Report EUR 22920*. Ispra, Eur. Comm., Jt. Res. Cent., 2007. 124 p. Available at: http://ccm.jrc.ec.europa.eu/documents/CCM2-Report_EUR-22920-EN_2007_STD.pdf.
5. Vogt J.V., Colombo R., Bertolo F. Deriving drainage networks and catchment boundaries: A new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. *Geomorphology*, 2003, vol. 53, nos. 3–4, pp. 281–298. doi: 10.1016/S0169-555X(02)00319-7.
6. Federal Standards and Procedures for the National Watershed Boundary Dataset (WBD) (4th ed.): Techniques and Methods 11–A3. In: *U.S. Geological Survey and U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2013*. 63 p. Available at: <http://pubs.usgs.gov/tm/11/a3/>.
7. Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A. Cartographic model of river basins of European Russia. *Geogr. Nat. Res.*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 131–138. doi: 10.1134/S1875372817020032.
8. Gesch D.B., Oimoen M.J., Evans G.A. Accuracy assessment of the U.S. Geological Survey National Elevation Dataset, and comparison with other large-area elevation datasets – SRTM and ASTER. In: *U.S. Geological Survey Open-File Report 2014–1008*, 2014. 10 p. doi: 10.3133/ofr20141008.
9. Danielson J.J., Gesch D.B. *Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010): Open-File Report 2011–1073*. Reston, U.S. Geol. Surv., 2011. 34 p. Available at: <https://pubs.usgs.gov/of/2011/1073/pdf/of2011-1073.pdf>.
10. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Podríguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.*, 2007, vol. 45, no. 2, pp. 1–33. doi: 10.1029/2005RG000183.
11. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J., Chapin E., Martin J., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products. In: *Technical Report JPL D-31639*. Pasadena, Jet Propul. Lab., 2005. 143 p. Available at: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf.
12. Aster GDEM General Description. Available at: <http://gis-lab.info/qa/aster-gdem.html>. (In Russian)
13. Gesch D.B. The effects of DEM generalization methods on derived hydrologic features. In: *Spatial Accuracy Assessment: Land Information Uncertainty in Natural Resource*. Chelsea, MI, CRC Press, 1999, pp. 255–262.
14. Danielson J.J., Gesch D.B. An enhanced global elevation model generalized from multiple higher resolution source datasets. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* (Beijing), 2008, vol. XXXVII, pt. B4, pp. 1857–1863.

15. Mal'tsev K.A., Yermolayev O.P. Using DEMs for automatic plotting of catchments. *Geomorfologiya*, 2014, no. 1, pp. 45–53. (In Russian)
16. Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Ivanov M.A. Automated construction of the boundaries of basin geosystems for the Volga Federal District. *Geogr. Nat. Res.*, 2014, no. 3, pp. 32–39. (In Russian)
17. Pogorelov A.V., Dumit Zh.A. *Rel'ef basseina r. Kubani: morfologicheskii analiz* [Topography of the Kuban' River Basin: Morphological Analysis]. Moscow, GEOS, 2009. 218 p. (In Russian)
18. O'Callaghan J., Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Comput. Vision Graphics Image Process.*, 1984, vol. 28, no. 3, pp. 323–344. doi: 10.1016/S0734-189X(84)80011-0.
19. Lindsay J.B. The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS. *Proc. GIS Res., UK 22nd Annu. Conf.* Glasgow, Univ. of Glasgow, 2014, pp. 16–18.
20. Shynbergenov E.A. Identification of floodplains of major rivers of Siberia (Ob, Yenisei, Lena) based on the data of remote sensing of the Earth (RS) from space]. *Treshnikovskie chteniya – 2017: Sovremennaya geograficheskaya kartina mira i tehnologii geograficheskogo obrazovania: Materialy Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Treshnikov Readings – 2017: Modern Geographical World Image and Technologies of Geographical Education: All-Russ. Sci.-Pract. Conf.]. Ulyanovsk, FGBOU VO “UIGPU im. I.N. Ul'yanova”, 2017, pp. 304–305. (In Russian)
21. Burrough P.A., McDonell R.A. *Principles of Geographical Information Systems*. New York, Oxford Univ. Press, 1998. 190 p.
22. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol. Processes*, 1991, vol. 5, no. 1, pp. 3–30. doi: 10.1002/hyp.3360050103.
23. Coordinates of meteorological stations. In: *Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut gidrometeorologicheskoi informatsii – Mirovoi Tsentri Danykh (VNIIGMI-MTsD). Federal'nyi Tsentri po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy* [All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI – WDC)]. Federal Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring]. Available at: <http://meteo.ru/data/155-meteostations>. (In Russian)
24. Air temperature and precipitation. In: *Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut gidrometeorologicheskoi informatsii – Mirovoi Tsentri Danykh (VNIIGMI-MTsD). Federal'nyi Tsentri po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy* [All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI - WDC)]. Available at: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>. (In Russian)
25. Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V. Burnt area assessment based on combined use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 9–27. (In Russian)
26. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 2011, vol. 8, no. 4, pp. 285–302. (In Russian)
27. *Edinyi gosudarstvennyy reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0. Kollektivnaya monografiya* [Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0. Joint Monograph]. Moscow, Pochv. Inst. im. V.V. Dokuchaeva Ross. S-kh. Akad., 2014. 768 p. (In Russian)
28. *Edinyi gosudarstvennyy reestr pochvennykh resursov Rossii* [Unified State Register of Soil Resources of Russia]. Available at: <http://egrpr.esoil.ru/index.php>. (In Russian)
29. Rukhovich D.I., Wagner V.B., Vil'chevskaya E.V., Kalinina N.V., Koroleva P.V. Problems of using digitized thematic maps on the territory of the former Soviet Union upon the creation the “Soils of Russia” geographic information system. *Eurasian Soil Sci.*, 2011, vol. 44, no. 9, pp. 957–968. doi: 10.1134/S1064229311090110.
30. Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Vilchevskaya E.V., Simakova M.S., Dolinina E.A., Rukhovich S.V. *Gosudarstvennaya pochvennaya karta – versiya ArcInfo* [State Soil Map – ArcInfo Version]. *Pochvovedenie*, 2013, no. 3, pp. 251–267. doi: 10.7868/S0032180X13030088 (In Russian)

31. *Pochvennaya karta RSFSR (otsifrovannyi original odnoimennoi pochvennoi karty). Masshtab: 1:2500 000* [Soil Map of the RSFSR (Digitized Version of the Soil Map with the Same Title. Scale: 1:2500 000)]. Fridland V.M. (Ed.). Moscow, GUGK, 1988. (In Russian)
32. Forests and forestry in Russia. Data and analysis. Landscapes. Available at: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/russian/for_cond_ru.html#landscapes. (In Russian)
33. *Landshaftnaya karta SSSR. Masshtab: 1:2500 000* [Landscape Map of the USSR. Scale: 1:2500 000]. Gudilin I.S. (Ed.). Moscow, 1987. 14 sht. (In Russian)
34. Lee S., Wolberg G., Shin S.Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines. *IEEE Trans. Visualization Comput. Graphics*, 1997, vol. 3, no. 3, pp. 228–244. doi: 10.1109/2945.620490.
35. Finley A., Banerjee S., Hjelle Ø., Bivand R. MBA: Multilevel B-spline Approximation. R package version 0.0-9. 2017. Available at: <http://CRAN.R-project.org/package=MBA>.
36. Wood S.N. Thin-plate regression splines. *J. R. Stat. Soc.*, 2003, vol. 65, no. 1, pp. 95–114. doi: 10.1111/1467-9868.00374.
37. Wood S.N. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Chapman and Hall/CRC, 2006. 476 p.
38. Hijmans R.J., van Etten J., Cheng J., Mattiuzzi M., Sumner M., Greenberg J.A., Lamigueiro O.P., Bevan A., Racine E.B., Shortridge A., Ghosh A. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.6-7. 2017. Available at: <http://CRAN.R-project.org/package=raster>.
39. Bivand R., Keitt T., Rowlingson B., Pebesma E., Sumner M., Hijmans R., Rouault E., Warmerdam F., Ooms J., Rundel C. rgdal: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library. R package version 1.2-18. 2018. Available at: <http://CRAN.R-project.org/package=rgdal>.
40. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. – R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2014. Available at: <http://www.R-project.org/>.
41. PostgreSQL. Available at: <https://www.postgresql.org/>.

Для цитирования: Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Хомяков П.В., Шынбергенев Е.А. Картографическая модель бассейновых геосистем малых рек водосбора реки Лены // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 1. – С. 126–144.

For citation: Yermolaev O.P., Malcev K.A., Mukharamova S.S., Khomyakov P.V., Shynbergenov Y.A. The cartographic model of basin geosystems of small rivers of the Lena River catchment area. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2018, vol. 160, no. 1, pp. 126–144. (In Russian)