

М.Г. Ерунова¹, О.Э. Якубайлик²

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ БАССЕЙНОВОГО ПОДХОДА

АННОТАЦИЯ

Бассейновый подход является эффективным инструментом для организации и управления природопользованием на региональном и межрегиональном уровнях. Статистическая обработка бассейновой информации позволяет проводить комплексную оценку окружающей среды водосборов рек разного иерархического уровня. Оценка состояния уникальных природных характеристик для каждого бассейна и выявление взаимосвязей между ними — это комплексная задача, которая требует применения различных методов и технологий геоинформационного моделирования с использованием многообразных наземных и спутниковых данных. В данной работе в качестве элементарной территориальной единицы выступают минимальные водосборные бассейны «пилотной» территории 4 водосборных бассейнов в Восточной Сибири со средней площадью около 1 га. Для каждого бассейна формируется набор атрибутов уникальных природных характеристик, которые получены на основе наземных исследований и спутниковых данных, а также климатических моделей. Такой набор атрибутов позволяет проводить оценку состояния территории на основе различных методов математического моделирования, статистического и кластерного анализа. Бассейновое моделирование территории проводилось на основе гидрологически корректной цифровой модели рельефа MERIT DEM Hydro. На основе спутниковой информации Terra/MODIS для каждого водосборного бассейна были получены данные по температуре, вегетационным индексам, растительному покрову. По данным реанализа NASA GPM и NCEP GFS для всех элементарных водосборных бассейнов были сформированы данные по накопленным осадкам. В рамках исследований был выполнен анализ сезонной динамики температуры поверхности исследуемой территории, получены статистические распределения изменения температуры поверхности в течение года для каждого водосборного бассейна, посчитана сумма активных температур воздуха выше 10 °С. Были получены статистические значения и среднегодовые характеристики трендов изменения вегетационных индексов NDVI, SAVI и LAI для каждого бассейна. Созданная геоинформационная модель является инструментом для обеспечения задач оценки состояния экосистем на основе ландшафтно-бассейнового подхода. Разработаны необходимые методы и технологии для создания, хранения и обработки данных о каждом водосборном бассейне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС, моделирование, водосборный бассейн, экосистемы, дистанционное зондирование

¹ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», ул. Академгородок, д. 50, Красноярск, Россия, 660036,
e-mail: marina@icm.krasn.ru

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/44, Красноярск, Россия, 660036,
e-mail: oleg@icm.krasn.ru

Marina G. Erunova¹, Oleg E. Yakubailik²

GEOINFORMATION MODELING OF ECOSYSTEMS BASED ON THE BASIN APPROACH

ABSTRACT

The basin approach is an effective tool for the organization and administration of environmental management at the regional and interregional levels. Statistical processing of basin information makes it possible to comprehensively assess the ecology of river catchment areas of different hierarchical levels. Assessing the state of unique natural characteristics for each basin and identifying relationships between them is a complex task that requires the use of various methods and technologies of geoinformation modeling using a variety of ground and satellite data. The elementary territorial unit in this work is the minimum watersheds of the pilot area of four watersheds in Eastern Siberia with an average area of about 1 ha. For each basin, a set of attributes of unique natural characteristics is formed, which are obtained on the basis of ground-based research and satellite data, as well as climate models. Such a set of attributes makes it possible to assess the state of the territory based on various methods of mathematical modeling, statistical and cluster analysis. Basin modeling of the territory was performed on the basis of a hydrologically correct digital relief model MERIT DEM Hydro. Based on Terra/MODIS satellite information, data on temperature, vegetation indices, and vegetation cover were obtained for each catchment area. According to the data of the NASA GPM and NCEP GFS reanalysis, data on accumulated precipitation were generated for all elementary watersheds. An analysis of the seasonal dynamics of surface temperature in the study area was carried out, and statistical distributions of changes in surface temperature during the year were obtained for each watershed. The sum of active air temperatures above 10 °C was calculated. Statistical values and average annual characteristics of trends in the vegetation indices NDVI, SAVI and LAI for each basin were obtained. The created geoinformation model is a tool for ensuring the tasks of assessing the state of ecosystems based on the landscape-basin approach. The necessary methods and technologies for creating, storing and processing data for each watershed have been developed.

KEYWORDS: GIS, modeling, watershed, ecosystem, remote sensing

ВВЕДЕНИЕ

Бассейновый подход является эффективным инструментом для организации и управления природопользованием на региональном и межрегиональном уровнях. Водосборные бассейны объединяют в единое целое природные характеристики и являются уникальными модельными объектами исследования [Рогов, Багайников, 2020; Neumann et al., 2021]. Модели управления территорией, разработанные на основе бассейнового подхода, встречаются для многих регионов [Браславская и др., 2020; Sun et al., 2020]. Главной особенностью бассейнового подхода является масштабность: из малых водосборных бассейнов можно собрать как «мозаику» средние или крупные водосборные бассейны — в зависимости от площади исследуемой экосистемы.

С появлением алгоритмов геоинформационного моделирования границ водосборов и ландшафтов [Ермолаев и др., 2015; Lindsay, 2016; Haag et al., 2020] бассейновый подход приобрел новые возможности использования бассейновой сети в качестве матрицы

¹ Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, 50, Akademgorodok str., Krasnoyarsk, 660036, Russia, e-mail: marina@icm.krasn.ru

² Institute of Computational Modeling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 50/44, Akademgorodok str., Krasnoyarsk, 660036, Russia, e-mail oleg@icm.krasn.ru

элементарных территориальных единиц, которые можно наполнять разнообразной информацией о состоянии территории. Бассейновый подход применяется для гидрологического моделирования [Liu et al., 2014], управления территориями [Жерелина, 1999; Neumann et al., 2021], оценки состояния экосистемы [Гинзбург и др., 2022], моделирования почвоводоохранного обустройства агроландшафтов [Кузьменко и др., 2012], картирования территории [Кузнецова, 2016] и т. д.

Оценка состояния уникальных природных характеристик для каждого бассейна и выявление взаимосвязей между ними — это комплексная задача, которая требует применения различных методов и технологий геоинформационного моделирования с использованием многообразных наземных и спутниковых данных [Луян и др., 2018; Murray et al., 2018]. Обычно используется большой набор атрибутов, включающий морфометрические характеристики рельефа, климатические показатели, тип почв и почвообразующих пород, растительный покров, антропогенную нагрузку и т. д. Многие спутниковые системы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) сегодня предоставляют свободный доступ к поступающим с них данным [Макарова, Владимирова, 2020], а развитие технологий автоматизированной обработки спутниковых данных позволяет обеспечить получение необходимой информации для решения задач, связанных с рациональным природопользованием в гидрологически определенных географических районах на региональном и межрегиональном уровнях.

Настоящая работа включает тематическое исследование территории Красноярского края (центральная часть бассейна р. Енисей). Сельское хозяйство Красноярского края находится в зоне рискованного земледелия. Определение уникальных характеристик природной среды поможет лицам, принимающим решения в государственном и частном секторах на всех уровнях, определить приоритеты финансирования.

Цель данной работы — это информационно-методическое обеспечение задач оценки состояния экосистем на основе бассейнового подхода с использованием методов и технологий геоинформационного моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная идея данной работы заключается в организации данных по природно-ресурсным характеристикам территории в одном географическом пространстве на основе бассейнового подхода. В качестве исходной информации используются разные по масштабу (пространственному разрешению) данные различного содержания. В частности, цифровой рельеф имеет пространственное разрешение 70 м, данные о температуре MODIS — около 1 км, данные о состоянии растительного покрова — 250 м и т. д. Бассейновый подход позволяет представить территорию в виде нескольких иерархически вложенных уровней, где верхний (первый) уровень — это уровень крупных рек, который включает в себя более детальный следующий уровень основных притоков этих рек, далее эти притоки включают мелкие речки, мелкие речки включают небольшие ручьи и т. д. В зависимости от масштаба используемых речных бассейнов на каждом уровне собираются природные характеристики соответствующего масштаба (детализации). В результате данные с низким пространственным разрешением привязываются к верхнему уровню водосборного деления, а более точные данные с высоким пространственным разрешением — к более детальному уровню. Иерархически организованная система вложенных друг в друга речных бассейнов обеспечивает возможность привязки имеющихся данных о природных ресурсах к соответствующим, оптимальным по масштабу уровням детализации.

Для организации такой многоуровневой базы данных природных характеристик территории в одном географическом пространстве использовались методы и технологии

геоинформационного моделирования, которые представлены в стандартном программном обеспечении ГИС. Технология организации многоуровневой базы данных заключалась в следующем. Сначала для выбранной территории исследования на основе цифровой модели рельефа MERIT Hydrologically Adjusted Elevations была создана модель водосборного деления. Далее выполнялось формирование многоуровневой иерархической структуры водосборного деления данной территории. Следующий этап — создание набора природных характеристик для каждого бассейна на всех масштабных уровнях в соответствии с детализацией исходных данных.

В качестве района исследования были выбраны водосборные бассейны нескольких крупных рек Красноярского края (Восточная Сибирь) — Кан, Мана, Туба и Оя общей площадью около 9 млн га, расположенные между 91–97° в. д. и широтами 52–56° с. ш. Выбранные водосборные бассейны находятся в центральной части Красноярского края Российской Федерации и включают разнообразные природные зоны: тайга, зона смешанных лесов (здесь расположен административный центр Красноярск), участки степи. На данной территории встречаются три формы рельефа: возвышенность (200–500 м), низкие горы (500–1000 м) и средние горы (1000–2000 м) (рис. 1). Среднегодовое количество осадков по статистике за 20 лет составляет около 650 мм/г. Климат на данной территории тоже разнообразен, средняя сумма активных температур (выше 10 °С) меняется от 650 до 2900 °С. На исследуемой территории представлено большое разнообразие природных и географических объектов. Среди них степные, лесостепные, таежные, смешанные и лиственные леса. Около половины территории занято сельскохозяйственными угодьями, расположенными в основном в долинах. Другая часть территории — горная тайга и тундра Саянских гор с крутыми склонами, перепадами рельефа.

Значительная часть рассматриваемой территории имеет высокое экономическое значение для Красноярского края. Здесь идет интенсивное развитие агропромышленного комплекса, горнорудной промышленности и туризма, формируется новая инфраструктура железнодорожного и автомобильного транспорта, развиваются экологически чистые производства с широким применением биотехнологий. Оценка потенциала экосистемных услуг данной территории позволит рационально управлять ее экосистемой.

Бассейновое моделирование

В рамках нашего исследования была разработана иерархическая модель классификации водосборных бассейнов исследуемой территории; которая состоит из четырех уровней. Для этого использовались геоинформационные системы (ГИС) WhiteBox GAT, QGIS с модулями GRASS и программное обеспечение ArcGIS [Erunova, Yakubailik, 2020]. В качестве исходных материалов использовались следующие данные:

1. (MERIT DEM) MERIT Hydrologically Adjusted Elevations DEM с пространственным разрешением 70 м [Yamazaki et al., 2019];
2. Векторный слой водосборных бассейнов, построенный в полуавтоматическом режиме с помощью специальных гидрологических модулей программного обеспечения WhiteBox GAT [Lindsay, 2016] на основе цифровой модели рельефа MERIT DEM;
3. Гидрографическая сеть с топографических карт м-ба 1: 1 000 000, 1: 2 500 000 и 1: 100 000 в векторном формате.

Технология моделирования бассейнов заключалась в следующем. На первом этапе инструментом Breach depressions была проведена предварительная обработка MERIT DEM в результате которой была сформирована цифровая модель рельефа, корректная для гидрографического анализа. Далее выполнялся этап формирования полубассейнов и

бассейнов, на основе работы алгоритма Sub-basins. Все перечисленные этапы были реализованы в программе WhiteBox GAT. Далее в программе QGIS проводилась заключительная обработка данных, коррекция границ и топологии слоя пространственных объектов водосборных бассейнов.

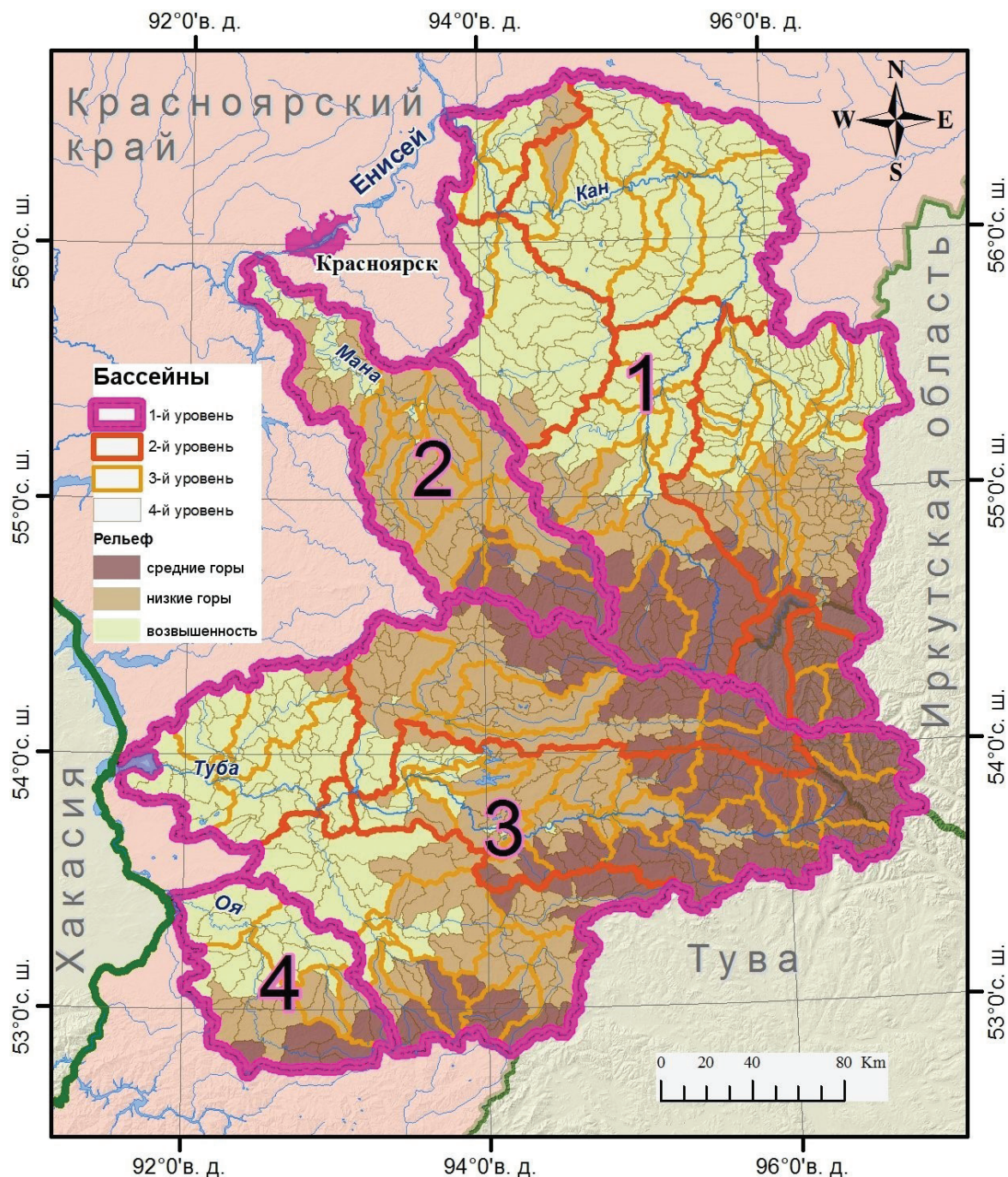


Рис. 1. Иерархические уровни водосборного деления района исследования на тематической карте рельефа: 1 — бассейн р. Кан; 2 — бассейн р. Маны; 3 — бассейн р. Тубы; 4 — бассейн р. Оу

Fig. 1. The hierarchically organized system of nested river watersheds in the study territory of thematic map of the relief: 1 — the Kan watershed; 2 — the Mana watershed; 3 — the Tuba watershed; 4 — the Oya watershed

Иерархическая структура водосборного деления

В ГИС ArcGIS формировались водосборные бассейны рек-притоков в иерархической системе 1-го, 2-го, 3-го и 4-го уровня водосборного деления. Для этого использовались векторные слои гидрографической сети разных масштабов.

1-й уровень водосборного деления составляют крупные реки Красноярского края: р. Кан имеет идентификатор 1, р. Мана — 2, р. Туба — 3, р. Оя — 4. 2-й уровень — это крупные притоки рек 1-го уровня, 3-й уровень делит бассейны 2-го уровня и т. д. (рис. 1).

Иерархические уровни водосборного деления выбирались исходя из детализации гидрографической сети и исходного набора природных характеристик по спутниковым и наземным данным разного масштаба. В целом была сформирована 4-уровневая классификация исследуемой территории. Всего создано 1105 бассейнов 4-го уровня, со средней площадью 0,008 км².

База данных природных характеристик

Расчет основных статистических показателей морфометрических характеристик рельефа для каждой водосборной территории осуществлялся в ГИС QGIS на основе скорректированной цифровой модели рельефа MERIT DEM. База данных морфологических характеристик состоит из следующих показателей: средняя высота, уклон и экспозиция склона. Определены основные статистические значения (минимальное, максимальное, среднее и среднее квадратичное отклонение).

Данные о температуре поверхности были подготовлены с использованием продукта Terra MODIS MOD11A2, архив которого находится в открытом доступе с 2000 г. Каждое изображение содержит информацию о дневной и ночной температуре поверхности Земли с пространственным разрешением около 1 км. Вегетационные индексы NDVI и SAVI были рассчитаны с использованием продукта MOD09Q1, где каждый пиксель имеет пространственное разрешение 250 м. Расчет вегетационного индекса LAI был основан на продукте MOD15A2H с пространственным разрешением 500 м.

Информация о растительном покрове исследуемой территории была получена из нескольких карт почвенно-растительного покрова России, карт пахотных земель России и ряда других наборов исходных данных [Барталев и др., 2016]. Все эти данные были созданы с использованием технологий автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования Земли. Цифровые карты, построенные в этой работе, основаны на данных Terra MODIS и Landsat. Сгенерированный набор данных имеет пространственное разрешение 250 м.

По всем водосборным бассейнам на основе архива данных Глобального измерения осадков (GPM) были подготовлены ежедневные данные о накоплении осадков с 2001 г. по настоящее время. Данная информация может быть использована для рассмотрения и решения различных задач в пространственно-временном моделировании динамики развития экосистем. Миссия GPM, инициированная NASA и JAXA, представляет собой международную сеть спутников, которые обеспечивают глобальные наблюдения за дождем и снегом.

Почвенный покров сформирован с использованием цифровых данных Единого государственного реестра почвенных ресурсов России. Данный регистр содержит векторные данные, полигональные объекты почвенной карты России в м-бе 1: 2 500 000 под ред. В.М. Фридланда (<http://egrpr.esoil.ru/>). К каждому полигону были привязаны атрибуты, включая диагностику и описание почв (тип почвы, подтип и т. д.). Данные о преобладающей характеристике почвы были добавлены для каждого водосборного бассейна.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследуемой территории построена четырехуровневая иерархическая система водосборных бассейнов с учетом гидрографической сети различных масштабов. Всего было создано 1105 бассейнов 4-го уровня со средней площадью 1 га, в т. ч. 479 бассейнов 4-го уровня для р. Кан, 94 — для р. Маны, 483 — для р. Тубы и 49 — для р. Ои. Полученная иерархическая структура позволяет добавлять более детальные уровни водосборного деления (5-й уровень и далее), если есть потребность в более подробной пространственной информации. Например, такими данными 5-го уровня могут быть карты водотоков на землях сельскохозяйственного назначения — по ним можно получить сведения о засушливых и переувлажненных участках, подготовить план проведения мелиоративных мероприятий. Наиболее целесообразным источником данных о рельефе в этом случае будет съемка с беспилотного самолета или квадрокоптера.

Сформирована база данных набора природных характеристик-атрибутов иерархической системы водосборного деления, которая состоит из морфологических характеристик, характеристик растительного и почвенного покрова; за 2000–2021 гг. каждый бассейн содержит значения (с шагом 8 дней) о температуре, выпавших осадков и вегетационных индексов NDVI, SAVI и LAI. Такой набор атрибутов позволяет проводить оценку состояния территории, используя различные методы математического моделирования, статистического и кластерного анализа.

На основе данных MERIT Hydro DEM был проведен анализ морфологических характеристик, таких как средняя высота, уклон и экспозиция склона, для каждого уровня иерархической системы водосборных бассейнов. В частности, вычислены следующие показатели для бассейна р. Ои: минимальная высота — 280 м, максимальная высота — 1373 м, средняя высота — 594 м, стандартное отклонение — 283 м. Перечисленные показатели также определены для рр. Туба, Мана и Кан. Для ранжирования водосборных бассейнов по средней высоте была использована стандартная классификация местности по абсолютной высоте (рис. 1).

Для территории 4 водосборных бассейнов был составлен и проанализирован архив спутниковых данных для каждого бассейна каждого уровня на основе 8-дневных безоблачных данных о среднесуточной температуре и нескольких вегетационных индексах, полученных Terra MODIS за 2000–2022 гг. Он может быть использован для анализа состояния и тенденций природной среды. Накопленная статистика дает основу для количественной оценки характеристик различными методами пространственного анализа: наложением, отбором, зонированием, сводной статистикой. Архив позволяет оценить состояние водосборных бассейнов любого уровня и сравнить динамику вегетационных показателей и температур, осадков для разных типов растительности или высотных поясов, типов характеристик почв.

Был выполнен анализ сезонной динамики температуры поверхности исследуемой территории, получены статистические распределения изменения температуры поверхности в течение разных лет для каждого бассейна. Посчитана средняя сумма активных температур воздуха выше 10 °C за 2000–2022 гг. На территории исследования находится несколько наземных метеостанций (рис. 2), архив которых находится в свободном доступе. Сравнение годового хода температуры по данным метеостанций и MODIS показывает хорошее соглашение между ними. Коэффициент корреляции данных о годовом ходе температур для всех метеостанций по сравнению с данными MODIS превышает 0,9 [Erunova et al., 2020]. По данным реанализа NASA GPM для всех элементарных водосборных бассейнов были сформированы данные по накопленным осадкам и ряду других характеристик за период 2000–2022 г. Сравнительный анализ полученных данных и данных с наземных метеостанций по осадкам показал высокую степень соответствия между рассмотренными

наборами данных [Yakubailik, Yakubaylik, 2020]. Так, например, в 2019 г. чрезмерное число дождей, наблюдавшееся в южных и местами в центральных районах, привело к увеличению количества осадков относительно нормы в 1.1–1.8 р. На рис. 2а представлена тематическая карта суммы накопленных осадков за 2019 г. и имеющиеся на данной территории наземные метеостанции. На рис. 2б представлен результат вычисления среднемноголетних значений количества накопленных осадков за период 2000–2020 гг.

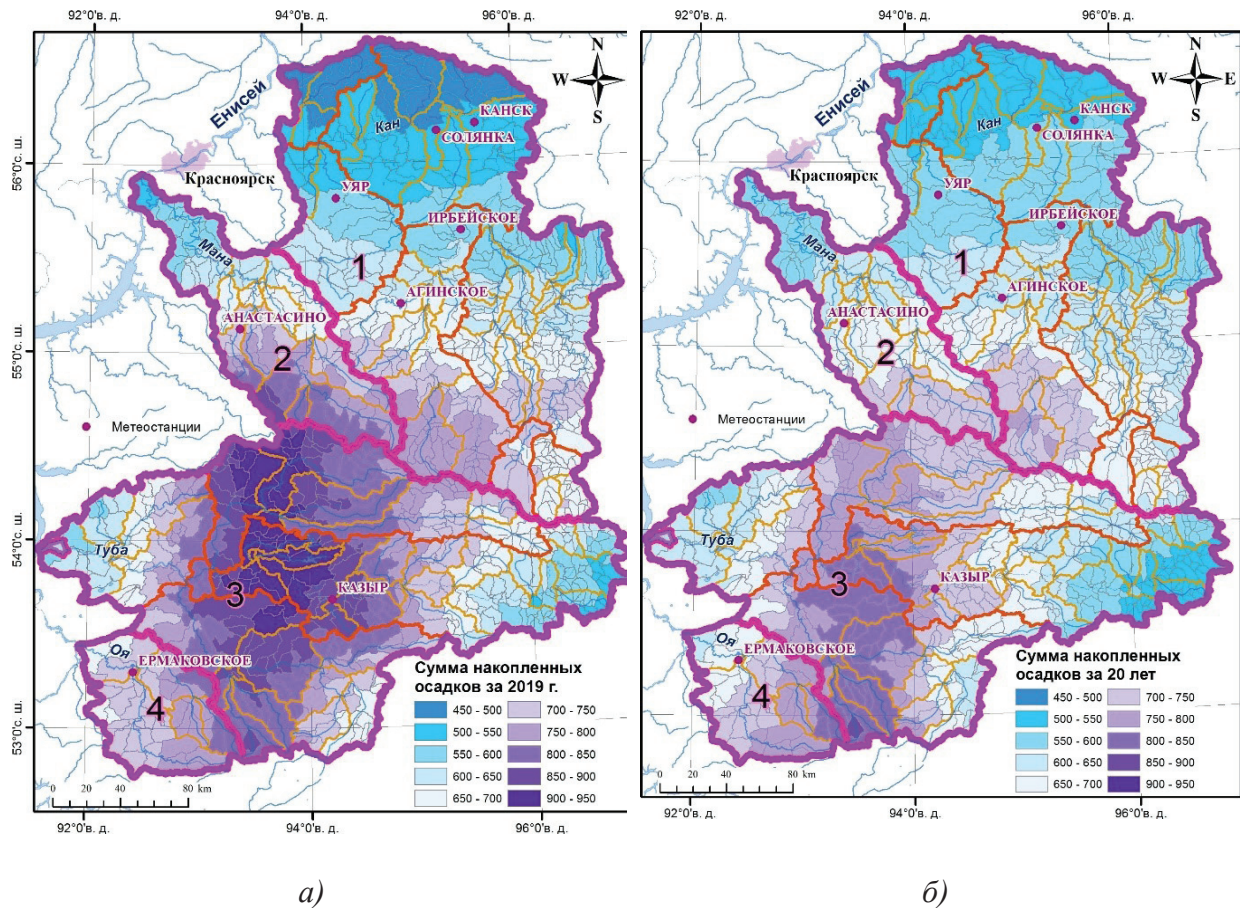
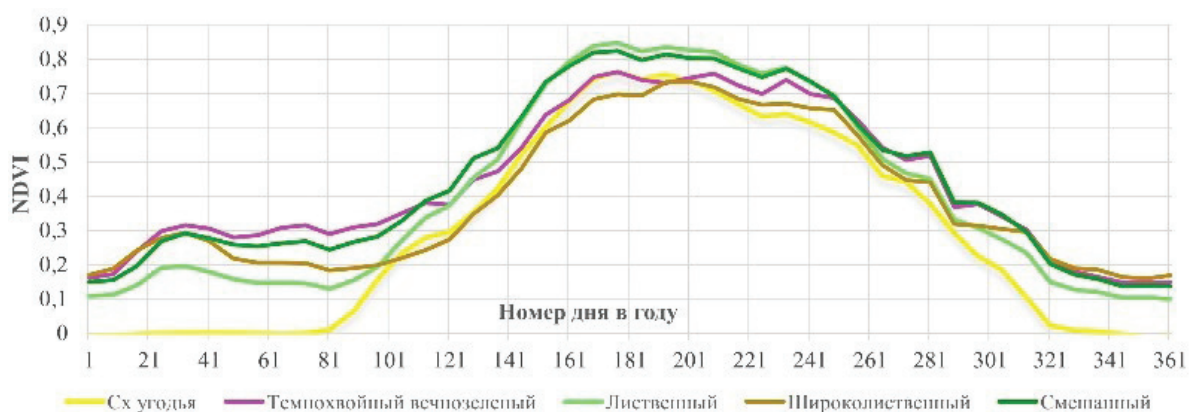


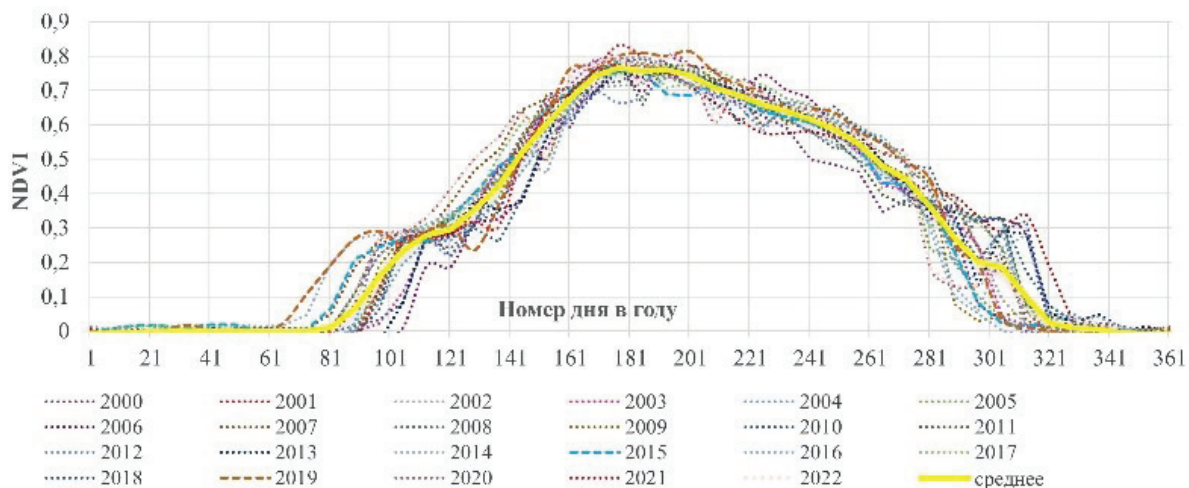
Рис. 2. Тематические карты суммы накопленных осадков:
а) за 2019 г.; б) за 2000–2020 гг.
Fig. 2. Thematic maps of the amount of accumulated precipitation:
а) for 2019; б) for 2000–2020

Были получены среднегодовые характеристики трендов изменения вегетационных индексов NDVI, SAVI и LAI для каждого бассейна. Накопленные данные позволяют выполнять количественную оценку развития сельскохозяйственных культур на рассматриваемой территории. На рис. 3б представлен ход средних значений динамики NDVI для сельскохозяйственных районов за отдельные года с 2000–2022 гг. На рис. 3а показаны средние значения за этот же период для некоторых типов растительности. Получены характеристики преобладающих видов растительного покрова (рис. 3в) и почвенного покрова. База данных характеристик почв содержит более 50 атрибутов, которые определяют характер и свойства почв.

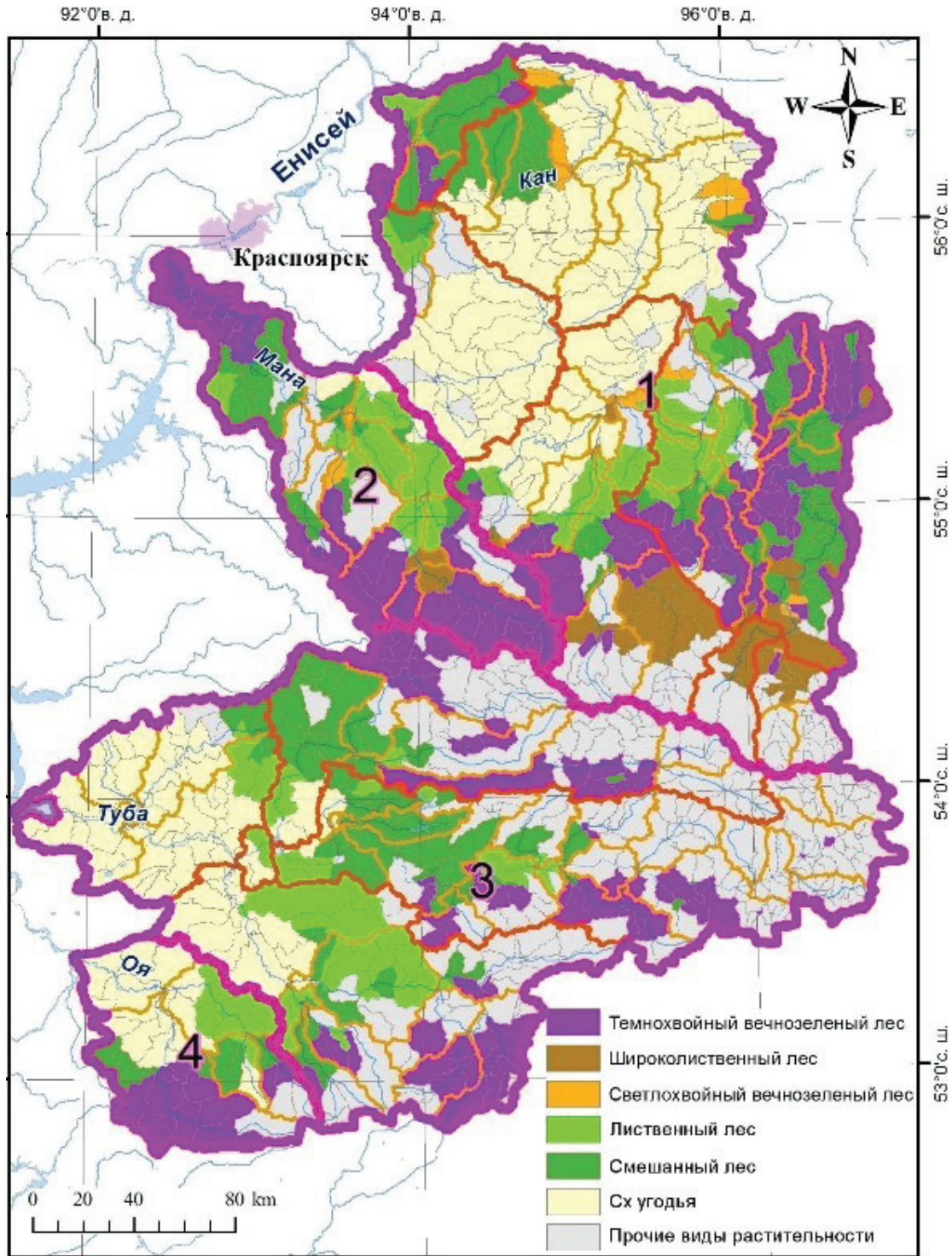
Данные многоуровневой иерархической системы разграничения водосборных бассейнов могут быть использованы для оценки состояния природных характеристик территории с использованием статистических и математических методов и программного обеспечения. В частности, открытый программный комплекс VidaExpert [Gorban, Zinovyev, 2015] был использован для проведения кластерного анализа нелинейным методом анализа и визуализации многомерных данных (метод эластичной карты) для выявления однородных участков по годовому колебанию температуры за 2019 г. Было обнаружено, что нелинейная кластеризация с использованием метода упругих карт позволяет точно выявить кластеры, которые объединили небольшие бассейны в группы со сходными географическими, климатическими и ландшафтными свойствами [Erunova et al., 2020].



а) а)



б) б)



в) с)

Рис. 3. а) Среднее значение динамики NDVI в течение 2000–2022 гг. для различных типов растительности; б) средние значения динамики NDVI в разные годы для сельскохозяйственных угодий; в) карта растительного покрова
Fig. 3. a) Average value of NDVI dynamics during 2000–2021 for different vegetation types; b) average values of NDVI dynamics in different years for farmlands; c) map of vegetation

ВЫВОДЫ

Разработана детальная многоуровневая иерархическая система разграничения водосборных бассейнов территории южного Красноярского края. Разработаны необходимые методы и технологии для создания, хранения и обработки данных о каждом водосборном бассейне. Методы многомерного анализа данных могут быть использованы для выявления закономерностей распределения данных и определения взаимосвязей между ними. Полученная многоуровневая база данных природных характеристик территории может быть расширена как по масштабу, за счет добавления более детального уровня бассейна, так и за счет наполнения его природными характеристиками не только продукта MODIS, но и других спутниковых продуктов. База данных природных характеристик, представленных в данном исследовании, служит для оценки состояния уникальных природных свойств каждого водосборного бассейна и выявления их взаимосвязей. Для рационального управления территорией необходимо правильно оценить состояние экосистемы. Предложенная методика формирования и использования совокупности природных характеристик территории позволяет осуществлять мониторинг изменений экосистем, планирование рациональной деятельности человека (землепользования), зонирование территории для оказания основных экосистемных услуг.

Важным результатом текущего исследования стала разработка информационно-методического обеспечения для задач оценки состояния экосистем на основе бассейнового подхода с использованием методов и технологий геоинформационного моделирования. Такой подход может быть использован в качестве инструмента дифференцированного финансирования агрохолдингов федеральными и муниципальными органами власти Красноярского края, в целях совершенствования экосистемного управления территорией и содействия социально-экономическому развитию региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

Браславская Т.Ю., Колбовский Е.Ю., Есипова Е.С., Коротков В.Н., Немчинова А.В., Чуракова Е.Ю., Козыкин А.В., Кулясова А.А., Алейников А.А. Ландшафтно-бассейновый подход в экологической оценке малонарушенных лесов Онежского полуострова. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2020. Т. 84 (6). С. 905–919. DOI: 10.31857/S2587556620060035.

Гинзбург А. И. Костяной А.Г., Шеремет Н.А., Ижицкий А.С., Соловьев Д.М. Динамика высыхания западного бассейна Большого Аральского моря по спутниковым данным (2002–2021). Современные проблемы ДЗЗ из космоса, 2022. Т. 19. № 5. С. 246–263. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263.

Ермолаев О.П. Мальцев К.А., Мозжерин В.В., Мозжерин В.И. Глобальная геоинформационная система «Сток взвешенных наносов в речных бассейнах Земли». Геоморфология и палеогеография, 2012. № 2. С. 50–58. DOI: 10.15356/0435-4281-2012-2-50-58.

Жерелина И.В. Бассейновый подход в управлении природопользованием: дис. ... канд. геогр. н., Барнаул, 1999. 203 с.

Кузнецова Т.И. Картографирование геосистем бассейна озера Байкал в пределах территорий России и Монголии для решения задач устойчивого развития. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», 2016. Т. 22. № 1. С. 297–309.

- Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Нарожняя А.Г.* Применение бассейновой концепции природопользования для почвоводоохранного обустройства агроландшафтов. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012. Т. 14. № 1 (9). С. 2432–2435.
- Лулян Е.А., Барталев С.А., Крашенинникова Ю.С., Плотников Д.Е., Толпин В.А., Уваров И.А.* Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018. Т. 15. № 2. С. 272–276. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.
- Макарова М. А., Владимировна Н. А.* Обзор ресурсов открытых пространственных данных о растительном покрове земли в сети Интернет. Ботанический журнал, 2020. Т. 105. № 4. С. 387–407. DOI: 10.31857/S0006813620040067.
- Рогов В.Ю., Багайников М.Л.* Бассейновый подход к формированию институтов экономического развития региона (применительно к Байкальскому региону). Вестник Забайкальского государственного университета, 2020. Т. 26. № 5. С. 106–117. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-5-106-117.
- Dangermond J.* GIS Foreword. World Spatial Metadata Standards, 2005. P. XV–XVI.
- Erunova M.G., Yakubailik O.E.* Zoning of the territory on the basis of morphometric analysis of basin geosystems. IOP Conference Series. Earth and Environmental Sciences, 2020. Т. 421. P. 062039. DOI: 10.1088/1755-1315/421/6/062039.
- Erunova M.G., Yakubailik O.E., Sadovsky M.G.* Annual temperature variation reliably identifies different sites in a large water basin. IOP Conference Series. Materials Science & Engineering, 2020. V. 862. P. 062060. DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062060.
- Gorban A.N., Zinovyev A.* Fast and user-friendly non-linear principal manifold learning by method of elastic maps. 2015 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). Paris. France, 2015. P. 1–9. DOI: 10.1109/DSAA.2015.7344818.
- Haag S., Schwartz D., Shakibajahromi B., Campagna M., Shokoufandeh A.* A fast algorithm to delineate watershed boundaries for simple geometries. Environmental Modelling & Software, 2020. V. 134. P. 104842. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104842.
- Lindsay J.B.* Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. Computers & Geosciences, 2016. V. 95. P. 75–84. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.07.003.
- Murray N.J., Keith D.A., Bland L.M., Legoretta L.F.* The role of satellite remote sensing in structured ecosystem risk assessments. Science of The Total Environment, 2018. V. 619–620. P. 249–257. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.034.
- Neumann A., Saber A., Arnillas C.A., Shimoda Yu.* Implementation of a watershed modelling framework to support adaptive management in the Canadian side of the Lake Erie basin. Ecological Informatics, 2021. V. 66. P. 101444. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101444.
- Schmidt P., Morrison T.H.* Watershed management in an urban setting: process, scale and administration. Land use policy, 2012. V. 29. No. 1. P. 45–52. DOI: 10.1016/j.landusepol.2011.05.003.
- Sun Y., Hao R., Qiao J., Xue H.* Function zoning and spatial management of small watersheds based on ecosystem disservice bundles. Journal of Cleaner Production, 2020. V. 255. P. 120285. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120285.
- Yakubailik O.E., Yakubaylik T.V.* Analysis of accumulated precipitation based on satellite data in Central Siberia. IOP Conference Series. Earth and Environmental Sciences, 2020. V. 548. No. 3. P. 032025. DOI: 10.1088/1755-1315/548/3/032025.

Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., Bates P.D., Allen G.H., Pavelsky T.M. MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset. *Water Resources Research*, 2019. V. 55. No. 6. P. 5053–5073. DOI: 10.1029/2019WR024873.

REFERENCES

Bartalev S., Egorov V., Zharko V., Loupian E., Plotnikov D., Khvostikov S., Shabanov N. Land cover mapping over Russia using Earth observation data. Moscow: Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, 2016. 208 p. (in Russian).

Braslavskaya T.Yu., Kolbowsky E.Yu., Esipova E.S., Korotkov V.N., Nemchinova A.V., Churakova E.Yu., Kozykin A.V., Kulyasova A.A., Aleinikov A.A. The Landscape-Basin Approach for Ecological Evaluation of Intact Forest Areas on the Onega Peninsula (Russia). *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2020. V. 84(6). P. 905–919 (in Russian). DOI: 10.31857/S2587556620060035.

Dangermond J. GIS Foreword. *World Spatial Metadata Standards*, 2005. P. XV–XVI.

Erunova M.G., Yakubailik O.E. Zoning of the territory on the basis of morphometric analysis of basin geosystems. *IOP Conference Series. Earth & Environmental Science*, 2020. V. 421. P. 062039 (in Russian). DOI: 10.1088/1755-1315/421/6/062039.

Erunova M.G., Yakubailik O.E., Sadovsky M.G. Annual temperature variation reliably identifies different sites in a large water basin. *IOP Conference Series. Materials Science & Engineering*, 2020. V. 862. P. 062060 (in Russian). DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062060.

Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A., Izhitskiy A.S., Soloviov D.M. The drying dynamics of the Western Large Aral Sea from satellite data (2002–2021). *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2022. V. 19. No. 5. P. 246–263 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263.

Gorban A. N., Zinovyev A. Fast and user-friendly non-linear principal manifold learning by method of elastic maps. 2015 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). Paris. France, 2015. P. 1–9. DOI: 10.1109/DSAA.2015.7344818.

Haag S., Schwartz D., Shakibajahromi B., Campagna M., Shokoufandeh A. A fast algorithm to delineate watershed boundaries for simple geometries. *Environmental Modelling & Software*, 2020. V. 134. P. 104842. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104842.

Kuzmenko Ya.V., Lisetsky F.N., Narozhnaya A.G. Application the basin concept of environmental management for soil-water safety arrangement of agrolandscapes. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012. V. 14. No. 1(9). P. 2432–2435 (in Russian).

Kuznetsova T.I. Geosystems mapping for solving the problems of sustainable development of lake Baikal basin within the transboundary area of Russia and Mongolia. *Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”*, 2016. V. 22. No. 1. P. 297–309 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-297-309.

Lindsay J.B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. *Computers & Geosciences*, 2016. V. 95. P. 75–84. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.07.003.

Loupian E.A., Bartalev S.A., Krashenninnikova Yu.S., Plotnikov D.E., Tolpin V.A., Uvarov I.A. Analysis of winter crops development in the southern regions of the European part of Russia in spring of 2018 with use of remote monitoring. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2018. V. 15. No. 2. P. 272–276 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.

- Makarova M.A., Vladimirova N.A.* The review of the Internet open spatial resources on Earth's vegetation cover. *Botanical journal*, 2020. V. 105. No. 4. P. 387–407 (in Russian). DOI: 10.31857/S0006813620040067.
- Murray N.J., Keith D.A., Bland L.M., Legoretta L.F.* The role of satellite remote sensing in structured ecosystem risk assessments. *Science of The Total Environment*, 2018. V. 619–620. P. 249–257. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.034.
- Neumann A., Saber A., Arnillas C.A., Shimoda Yu.* Implementation of a watershed modelling framework to support adaptive management in the Canadian side of the Lake Erie basin. *Ecological Informatics*, 2021. V. 66. P. 101444. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101444.
- Rogov V., Bagaynikov M.* Pool approach to the formation of institutions of economic development of the region (applicable to the Baikal region). *Transbaikal State University Journal*, 2020. V. 26. No. 5. P. 106–117 (in Russian). DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-5-106-117.
- Schmidt P., Morrison T.H.* Watershed management in an urban setting: process, scale and administration. *Land use policy*, 2012. V. 29. No. 1. P. 45–52. DOI: 10.1016/j.landusepol.2011.05.003.
- Sun Y., Hao R., Qiao J., Xue H.* Function zoning and spatial management of small watersheds based on ecosystem disservice bundles. *Journal of Cleaner Production*, 2020. V. 255. P. 120285. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120285.
- Yakubailik O.E., Yakubalik T.V.* Analysis of accumulated precipitation based on satellite data in Central Siberia. *IOP Conference Series. Earth Environmental Sciences*, 2020. V. 548. No. 3. P. 032025 (in Russian). DOI: 10.1088/1755-1315/548/3/032025
- Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., Bates P.D., Allen G.H., Pavelsky T.M.* MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset. *Water Resources Research*, 2019. V. 55. No. 6. P. 5053–5073. DOI: 10.1029/2019WR024873.
- 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”. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. 2012. No. 2. P. 50–58 (in Russian). DOI: 10.15356/0435-4281-2012-2-50-58.
- Zherelina I.V.* Basin approach in environmental management. PhD dissertation. Barnaul, 1999. 203 p.
-