

К.А. Обутов, Ю.Г. Данилов

СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

e-mail: obutov-kirill@mail.ru

e-mail: dan57sakha@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ МАЛЫХ РЕК НА ПРИМЕРЕ ХАНГАЛАССКОГО РАЙОНА РС (Я)

Аннотация. В настоящее время слабая развитость и закрытость геоинформационных систем (ГИС), привязанных к речным бассейнам в России, может затруднять работу важных оперативных служб природоохранного и гидрометеорологического наблюдения. Важно отметить, что упрощение и ускорение выделения бассейнов рек, посредством открытого программного обеспечения, может позволить значительно оптимизировать работу исследователей, особенно в условиях, когда важно оперативно реагировать на наводнения и паводки в сжатые сроки. Целью данной работы является автоматизация процессов выделения водосборных бассейнов рек, что может помочь при исследовании обширных территорий Дальнего Востока, а также поспособствовать созданию эффективных систем прогнозирования и мониторинга. В исследовании представлен автоматизированный подход к идентификации водосборных бассейнов, базирующийся на использовании геопространственных данных и алгоритмов обработки информации. Представленный метод демонстрирует эффективное выделение границ водосборных бассейнов, что позволяет упростить процесс исследования и повысить точность полученных данных. Исследование проводилось на примере Хангаласского района РС (Я). Данные цифровой модели рельефа корректировались (проецирование в местную систему координат и приведение значений пикселей к одинаковому размеру, выделение необходимой области), а затем использовались для быстрого, посредством разработанного авторами алгоритма, выделения водосборных бассейнов. Алгоритм представляет собой модуль для QGIS, который по очереди использует инструменты QGIS и GDAL (“Fill sinks”, “Flow accumulation”, “Upslope area” и др.), что значительно ускоряет процесс создания материалов для дальнейших исследований. Результаты исследования подчеркивают доступность получения информации о геосистемах речных бассейнов как о целостных системах и выдвигают перспективу улучшения ГИС-процессов, связанных с водными ресурсами, для более эффективного мониторинга экосистем и принятия решений в области природоохраны.

Ключевые слова. ГИС, автоматизация выделения, автоматизация определения, водосборные бассейны, границы бассейнов, Республика Саха (Якутия), GDAL, QGIS, SAGA GIS.

К.А. Obutov, Yu.G. Danilov

M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

e-mail: obutov-kirill@mail.ru

e-mail: dan57sakha@mail.ru

AUTOMATION OF DETERMINING THE BOUNDARIES OF RIVER BASINS OF SMALL RIVERS: THE CASE OF KHANGALASSKY DISTRICT, SAKHA REPUBLIC (YAKUTIA)

Abstract. Currently, the absence of a GIS system linked to river basins in Russia may complicate the work of important operational environmental and hydrometeorological surveillance services. It is important to note that simplifying and accelerating the allocation of river basins through open source software can significantly optimize the work of researchers, especially in conditions where it is important to respond promptly to floods and floods in a short time. The purpose of this work is to automate the allocation of river catchment areas, which can help in the study of vast territories of the Far East, as well as contribute to the creation of effective forecasting and monitoring systems. The study presents an automated approach to the identification of watersheds based on the

use of geospatial data and information processing algorithms. The presented method demonstrates the effective allocation of watershed boundaries, which makes it possible to simplify the research process and increase the accuracy of the data obtained. The study was conducted within the boundaries of Khangalassky district of the SR(Ya). The data obtained using digital terrain models were corrected, and then used for rapid allocation of watersheds by means of an algorithm developed by the authors. The algorithm is a module for QGIS, which uses the QGIS and GDAL tools in turn, which significantly speeds up the process of creating materials for further research. The results of the study emphasize the accessibility of obtaining information about the geosystems of river basins as integral systems and put forward the prospect of improving GIS processes related to water resources for more effective monitoring of ecosystems and decision-making in the field of environmental protection.

Keywords: GIS, automation of allocation, automation of definition, catchment basins, basin boundaries, Sakha Republic (Yakutia), GDAL, QGIS, SAGA GIS.

Введение

Речной бассейн для пространственной оценки территорий суши умеренного пояса Земли является наиболее доступной и эффективной единицей оценки геосистем. Показано, что бассейны рек, озер и морей – самые распространенные на поверхности суши природные комплексы высокой степени целостности, с четкими границами-водоразделами, обладающие мощным интегрирующим фактором – водным потоком [1]. Во многих российских научных работах [1, 2, 3] исследователи сходятся во мнении, что бассейн является многомерной и самостоятельной системой, обладающей рядом особенностей и закономерностей: уникальность, иерархичность, устойчивость, саморегулирование. А также историчность – речной бассейн представляет собой результат исторического развития территории и слагающих ее элементов: почв, рек, материнской породы и биоты. И такая совокупность данных выделяет главную особенность – универсальность, бассейновые системы могут служить базовой единицей при пространственной организации земной поверхности, так как всю поверхность Земли можно представить совокупностью бассейновых систем разного масштаба [3] обладающих при этом объективными границами – водоразделами.

Благодаря этому, бассейновая концепция природопользования дает возможность получать нетрадиционные результаты на «стыках» наук и позволяет использовать бассейны как топологическую единицу при последовательном переходе от локального к региональному и национальному уровням исследования [4]. И так как бассейновая концепция укоренилась и используется во многих исследованиях [4, 5, 6], и завязана на работе с большим количеством речных сетей, в том числе малых, детальное построение каждого отдельного бассейна может занимать довольно много времени. Следующим логичным шагом может являться упрощение и ускорение выделения этих самых бассейнов. Что является актуальной задачей природопользования, так как данный момент в России нет доступной ГИС (за исключением HydroSheds), привязанной к речным бассейнам. Что затрудняет налаживание необходимой инфраструктуры оперативного прогнозирования и реагирования в следствие все более регулярно случающихся наводнений и паводков на Дальнем Востоке России.

Целью данной работы является автоматизация части процессов при построении водосборных бассейнов рек на примере рек второго и третьего порядков р. Лена в Хангаласском районе Якутии.

Материалы и методы исследования

В качестве исследовательского региона был выбран Хангаласский район Республики Саха Якутия. Этот регион был выбран вследствие слабой географической изученности бассейнов малых рек и большой изменчивости климатических и разнообразию орографических условий.

На данный момент существует множество цифровых моделей рельефа (далее – ЦМР), но многие из них имеют различные недостатки: будь то ограниченный набор данных, в связи с тем, что материалов для территории, располагающейся севернее 60° С.Ш. меньше, до различ-

ных искажений в равнинных регионах, где ошибки высот превышали изменчивость топографии [7]. Итого из доступных для исследования моделей, имеющих в открытом доступе, остаются лишь ArcticDEM [8], SRTM3 v2.1 и AW3D-30m v1, в которых устранены основные компоненты ошибок из существующих ЦМР (NASA SRTM3 DEM, JAXA AW3D DEM, Viewfinder Panoramas' DEM) [7], имеют охват выше 60 С.Ш. и достаточное разрешение.

После подбора исходных данных, но перед основной работой происходит корректировка полученных ЦМР с помощью программного обеспечения QGIS, а именно инструмента Resampling для установления одинакового разрешения растров (если они получены из разных источников), а также для проецирования их в местную систему координат.

Затем авторами был применен модуль, написанный для данной работы для QGIS, который позволяет массово и быстро выделять бассейны рек второго и третьего порядков. Его суть заключается в использовании инструментов, которые есть в QGIS и GDAL, но в автоматическом режиме. Алгоритм работы модуля (рис. 1) заключается в том, что оператор добавляет ЦМР и векторный файл реки Лена, а затем модуль поочередно выполняет различные встроенные в QGIS, SAGA GIS и GDAL инструменты для выделения водосборных бассейнов рек.

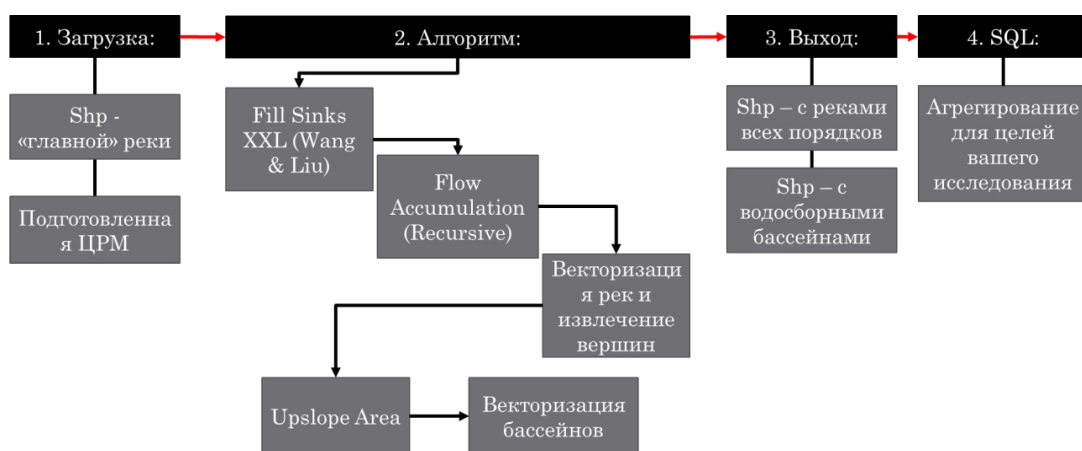


Рис. 1. Алгоритм работы модуля для выделения речных бассейнов. (Красные линии показывают переход между «шагами», черные – взаимодействия внутри «шагов»)

Fig. 1 The algorithm of the module for the allocation of river basins.

(The red lines symbolize the transition between the “steps”, the black lines represent the interactions within the “steps”)

Сначала это заполнение локальных понижений [9] и выделение потока речной сети (рис. 2), затем построение вершин, которые будут служить створом для выделения порядка рек и после этого построение речного бассейна. Изначально бассейны рек представлены в растровом формате, поэтому данные векторизуются и как итог получается два векторных слоя: с речной сетью (в атрибутах, которой прописан порядок рек) и речные бассейны.

Заключаящим этапом была корректировка полученных векторных файлов – удаление некорректных полигонов, лежащих вне речной системы Лены

Результаты построения границ бассейнов рек в автоматическом режиме представляется в виде векторного слоя полигональных объектов (бассейнов рек и включенных межприточных пространств, если такие имеются). Также особенностью работы является высокая зависимость от исходных данных, так иногда при заполнении понижений карстовые провалы воспринимались за водные объекты, что создавало несколько обманчивую картину наличия речных систем там, где они отсутствуют. К тому же в связи с особенностью автоматизации выделения

```
def fill_sinks(input_raster, output_raster):
    input_dataset = gdal.Open(input_raster, gdalconst.GA_ReadOnly)
    input_band = input_dataset.GetRasterBand(1)
    nodata = input_band.GetNoDataValue()

    # Чтение данных в массив NumPy
    data = input_band.ReadAsArray()
    data_copy = data.copy()

    # Заполнение впадин (Fill Sinks)
    for i in range(1, data.shape[0] - 1):
        for j in range(1, data.shape[1] - 1):
            if data[i, j] == nodata:
                data_copy[i, j] = np.nan
    filled_data = fill(data_copy)

    # Запись результатов в новый растровый файл
    driver = gdal.GetDriverByName('GTiff')
    output_dataset = driver.Create(output_raster, input_dataset.RasterXSize, input_dataset.RasterYSize, 1, gdalconst.GDT_Float32)
    output_dataset.SetGeoTransform(input_dataset.GetGeoTransform())
    output_dataset.SetProjection(input_dataset.GetProjection())
```

Рис. 2. Пример функции заполнения понижений
Fig. 2 An example of the function of filling depressions

речных створов (которое необходимо для правильного определения иерархического порядка реки), иногда происходило ошибочное присвоение места в порядке, эта проблема на данном уровне исследования решается путем быстрого осмотра атрибутивной таблицы на наличие аномалий и последующее исправление их.

Результаты исследования

Результатом работы алгоритма является набор векторных данных, с помощью которого были созданы карты малых речных бассейнов (рис. 3), а также созданная на их основе база данных. Это позволяет довольно быстро собрать необходимый материал для изучения особенностей бассейновых геосистем, их формирования и саморегулирования, а также проводить тематическое и комплексное картографирование бассейнов с достаточно высокой степенью пространственной детальности и экономией времени.

На основе полученных можно рассчитать различные морфометрические характеристики, например, средний уклон бассейнов рек второго и четвертого порядков (рис. 4) и построенные на этой же основе таблица и диаграмма (рис. 5).

Как видно из рис. 4, 5 в районе исследования доминирует покатый тип рельефа, занимая больше половины площади района, средний уклон составляет $\sim 2^\circ$, а наиболее высокий уклон наблюдается на правом берегу Лены выше по течению. Приведенные методы и данные могут быть использованы в дальнейших исследованиях и расчетах.

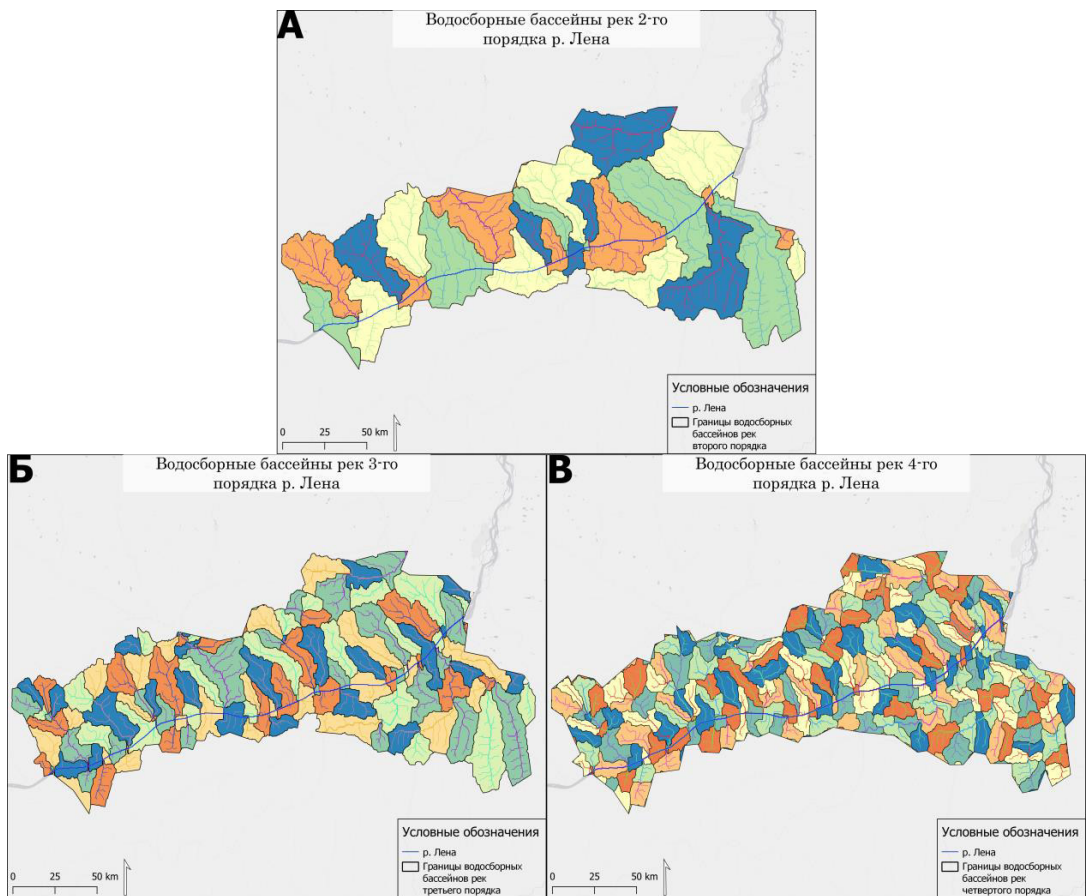


Рис. 3. Карта водосборных бассейнов рек 2-го (А), 3-го (Б), 4-го (В) порядков р. Лена
(Различными цветами выделены речные системы)

Fig. 3 Map of catchment basins of rivers of the 2nd (A), 3rd (B), 4th (C) orders of the Lena River
(River systems are highlighted in different colors)

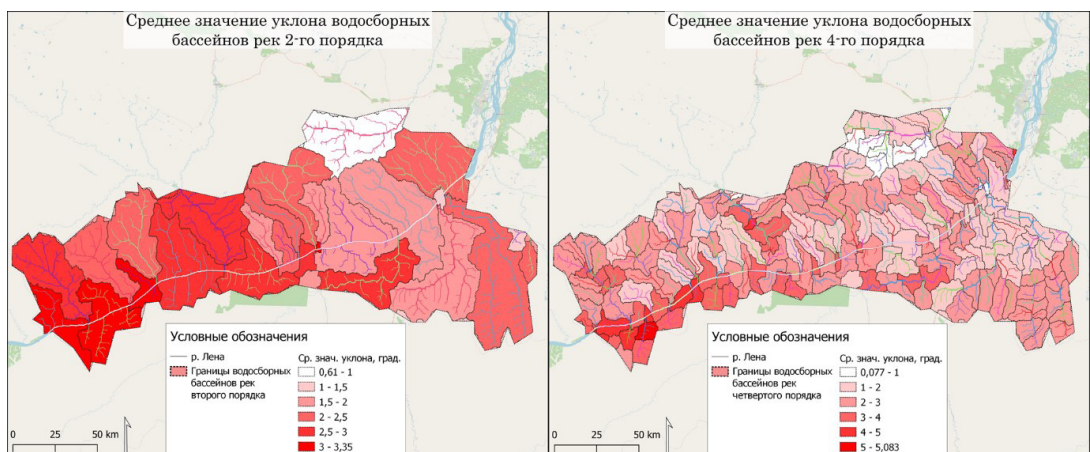


Рис. 4. Среднее значение уклона водосборных бассейнов рек 2-го (слева) и 4-го (справа) порядков
р. Лена в Хангаласском районе

Fig. 4 The average slope of the catchment basins of the rivers of the 2nd (left) and 4th (right) orders
of the Lena River in Khangalassky district



Рис. 5. Доля типа уклона от общей площади водосбора р. Лена в Хангаласском районе

Fig. 5 The proportion of the slope type from the total catchment area of the Lena River in Khangalassky district

Заключение

В данном исследовании авторами проведена предварительная обработка исходных данных, коррекция ЦМР. Построены границы водосборных бассейнов на всю территорию исследования в автоматическом режиме. Создана карта бассейновых геосистем малых рек, соответствующая локальному уровню генерализации.

Предложенный в данной работе алгоритм позволяет автоматизировать построение и расчет характеристик водосборных бассейнов для более быстрой агрегации данных. Это, в свою очередь, позволяет значительно экономить время при выполнении следующих задач: подготовка растровых и векторных данных, разбиение крупного водосбора на меньшие бассейны, вычисление геоморфологических характеристик.

Литература

1. Корытный, Л.М. Бассейновая концепция: от гидрологии к природопользованию / Л.М. Корытный. – Текст: непосредственный // География и природные ресурсы. – 2017. – № 2. – С. 5-16. – DOI 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(5-16). – EDN YSKUWF.
2. Антипов, А.Н. Сибирская школа ландшафтной гидрологии. Географо-гидрологические исследования / А.Н. Антипов, Л.М. Корытный – Текст: непосредственный // Вопросы географии. – 2012. – № 133. – С. 32-47. – EDN TLYUWX.

3. Шишкин, А.С. Бассейновый принцип организации ландшафтных структур / А.С. Шишкин, Т.А. Буренина, Т.В. Пономарева, Д.Ю. Ефимов. – Текст: непосредственный // Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски : Материалы Всероссийской конференции с международным участием, Красноярск, 26–31 августа 2019 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Научный совет РАН по проблемам леса, Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Сибирский федеральный университет, Международный институт прикладного системного анализа, Международная ассоциация исследователей бореальных лесов. – Красноярск: Институт леса СО РАН, 2019. – С. 524-528. – EDN EPBDDR.
4. Плотникова, А.С. Выделение границ водосборных бассейнов рек на локальном пространственном уровне / А.С. Плотникова, А.О. Харитонова. – Текст: непосредственный // Вопросы лесной науки. – 2018. – Т. 1, № 1. – С. 1-10. – DOI 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-10. – EDN VRHPKX.
5. Ермолаев, О.П. Картографическая модель бассейновых геосистем малых рек водосбора реки Лены / О.П. Ермолаев, К.А. Мальцев, С.С. Мухарамова [и др.]. – Текст: электронный // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2018. – Т. 160, № 1. – С. 126-144. – EDN XUGKPR.
6. Балдаков, Н.А., Кудишин А. В. Автоматизация расчета характеристик водосборного бассейна для решения задач моделирования поверхностного стока / Н.А. Балдаков, А.В. Кудишин. – Текст: электронный // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 4, № 1. – С. 83-89. – DOI 10.33764/2618-981X-2019-4-1-83-89. – EDN JNEMGJ.
7. Yamazaki, D. A high accuracy map of global terrain elevations / D. Yamazaki, D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J.C. Neal, C.C. Sampson, S. Kanae, P.D. Bates. Text : original // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, Is. 11. P. 5844–5853. DOI: 10.1002/2017GL072874.
8. Porter Claire “ArcticDEM, Version 4.1” / Claire Porter [et al.]. – Text : electronic // Harvard Dataverse, V1, 2023, DOI : 10.7910/DVN/3VDC4W, [20.04.2024]
9. Wang, L. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling / L. Wang, H. Liu. – Text : electronic // International Journal of Geographical Information Science, Vol. 20, No. 2: 193-213.

References

1. Korytnyj, L.M. Bassejnovaja koncepcija: ot gidrologii k prirodopol'zovaniju / L.M. Korytnyj. – Текст: непосредственный // География и природные ресурсы. – 2017. – № 2. – С. 5-16. – DOI 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(5-16). – EDN YSKUWF.
2. Antipov, A.N. Sibirskaja shkola landshaftnoj gidrologii. Geografo-gidrologicheskie issledovaniya / A.N. Antipov, L.M. Korytnyj – Текст: непосредственный // Вопросы географии. – 2012. – № 133. – С. 32-47. – EDN TLYUWX.
3. Shishikin, A.S. Bassejnovyj princip organizacii landshaftnyh struktur / A.S. Shishikin, T.A. Burenina, T.V. Ponomareva, D.Ju. Efimov. – Текст: непосредственный // Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биэкономика, экологические риски : Материалы Всероссийской конференции с международным участием, Красноярск, 26–31 августа 2019 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Научный совет РАН по проблемам леса, Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Сибирский федеральный университет, Международный институт прикладного системного анализа, Международная ассоциация исследователей бореальных лесов. – Красноярск: Институт леса СО РАН, 2019. – С. 524-528. – EDN EPBDDR.
4. Plotnikova, A.S. Vydelenie granic vodosbornyh bassejnov rek na lokal'nom prostranstvennom urovne / A.S. Plotnikova, A.O. Haritonova. – Текст: непосредственный // Вопросы лесной науки. – 2018. – Т. 1, № 1. – С. 1-10. – DOI 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-10. – EDN VRHPKX.

5. Ermolaev, O.P. Kartograficheskaja model' bassejnovykh geosistem mal'yx rek vodosbora reki Leny / O.P. Ermolaev, K.A. Mal'cev, S.S. Muharomova [i dr.]. – Tekst: jelektronnyj // Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Serija: Estestvennye nauki. – 2018. – T. 160, № 1. – S. 126-144. – EDN XUGKPR.

6. Baldakov, N.A., Kudishin A. V. Avtomatizacija rascheta harakteristik vodosbornogo bassejna dlja reshenija zadach modelirovanija poverhnostnogo stoka / N.A. Baldakov, A.V. Kudishin. – Tekst: jelektronnyj // Interjekspo Geo-Sibir'. – 2019. – T. 4, № 1. – S. 83-89. – DOI 10.33764/2618-981X-2019-4-1-83-89. – EDN JNEMGJ.

7. Yamazaki, D. A high accuracy map of global terrain elevations / D. Yamazaki, D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J.C. Neal, C.C. Sampson, S. Kanae, P.D. Bates. Text : original // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, Is. 11. P. 5844–5853. DOI: 10.1002/2017GL072874.

8. Porter Claire “ArcticDEM, Version 4.1” / Claire Porter [et al.]. – Text : electronic // Harvard Dataverse, V1, 2023, DOI : 10.7910/DVN/3VDC4W, [20.04.2024]

Wang, L. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling / L. Wang, H. Liu. – Text : electronic // International Journal of Geographical Information Science, Vol. 20, No. 2: 193-213.

Сведения об авторах

ОБУТОВ Кирилл Андреевич – аспирант Эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, e-mail: obutovkirill@gmail.com

OBUTOV Kirill Andreevich – postgraduate student, Department of Ecology and Geography, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, e-mail: obutovkirill@gmail.com

ДАНИЛОВ Юрий Георгиевич – к.г.н., заместитель ректора СВФУ по вопросам устойчивого развития арктических территорий, профессор эколого-географического отделения ИЕН СВФУ, доцент, e-mail: dan57sakha@mail.ru

DANILOV Yuri Georgievich – Candidate of Geographical Sciences, Deputy Rector for Sustainable Development of the Arctic Territories, Associate Professor, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, e-mail: dan57sakha@mail.ru