

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОЖДЕВОГО СТОКА

Ольга Вольфовна Ловцкая

Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, старший научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (385)266-65-01, e-mail: lov@iwep.ru

Алексей Васильевич Кудишин

Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (385)266-65-01, e-mail: avkudishin@yandex.ru

Анастасия Борисовна Голубева

Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, младший научный сотрудник, лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (385)266-65-01, e-mail: apticagolub@yandex.ru,

В статье рассмотрены основные этапы подготовки пространственных данных для компьютерных моделей формирования стока на примере бассейна р. Чарыш. Представлена схема подготовки ЦМР и создание на ее основе гидравлической структуры водосборного бассейна. Приведены источники данных по растительности и по механическому составу почв. По цифровой модели рельефа бассейна построена система подбассейнов, гидрологический граф и вычислены морфометрические характеристики его элементов. На основе почвенной базы данных Harmonized World Soil Database и почвенной карты Алтайского края разработана карта текстуры (механического состава) почв бассейна р. Чарыш. Проведено сопоставление двух способов учета осадков: данные по метеостанциям; набор данных Persiann-CDR. Представлены результаты расчетов стока с водосбора р. Чарыш по двум моделям.

Ключевые слова: ГИС, ЦМР, водосборный бассейн, почвенные карты, Persiann-CDR

USING SPATIAL DATA TO SIMULATE RAIN RUNOFF

Olga V. Lovtskaya

Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, Senior Researcher of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (385)266-65-01, e-mail: lov@iwep.ru

Alexey V. Kudishin

Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, Ph. D., Senior Researcher of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (385)266-65-01, e-mail: avkudishin@yandex.ru

Anastasiya B. Golubeva

Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, Junior Researcher of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (385)266-65-01, e-mail: apticagolub@yandex.ru

The paper presents the main stages of spatial data preparation for computer models of runoff formation by the example of the Charysh River basin. DEM was employed to construct a system of sub-basins and a hydrological graph as well as to calculate morphometric characteristics of its elements. Sources of data on vegetation and mechanical composition of soils are given. Using the Harmonized World Soil Database and the soil map of Altai Krai, a map of soil texture (grain-size composition) of the Charysh River basin was created. Two ways of precipitation accounting (the weather station data; the Persiann-CDR data set) were compared. Calculations of runoff from the the Charysh catchment were made for two models.

Keywords: GIS, DEM, catchment area, soil maps, Persiann-CDR

Введение

Исследование влияния гидрологических условий бассейна на формирование стока требует пространственно-распределенных моделей, достаточно детально описывающих физические процессы на водосборе. В настоящее время за рубежом и в нашей стране имеется большое число развитых моделей и реализующих их программных продуктов [1].

Необходимо отметить высокие требования к обеспеченности таких моделей большими объемами натурной информации (метеоданные, гидрологические данные, подробные ЦМР). Эти данные, в частности, обеспечиваются густой сетью метеостанций и гидропостов. В нашей стране подобный уровень натурной информации отсутствует, что ставит под сомнение возможность использования инструментария, развитого в рамках таких систем. Адаптация существующих систем прогноза или разработка оригинальных требует предварительных исследовательских работ по интересующим водосборам.

В случае редкой сети гидрологических и метеорологических наблюдений можно использовать модели типа «осадки–сток» [2] для определения расходов воды независимо от наличия постов наблюдения, но с использованием информации о физико-географических и гидрографических характеристиках исследуемого речного бассейна. Модели такого типа основаны на анализе цифровой модели местности, определении количества и качества выпавших осадков на водосборе, учете инфильтрационных свойств почвы.

Для подготовки и использования этих данных в моделях типа «осадки–сток», расчетным элементом которых является естественный водосбор, необходим определенный методологический подход и программный инструментарий.

Материал статьи основан на разработке такого подхода на примере водосбора р. Чарыш (левый приток р. Обь, Алтайский край).

Формирование дождевых паводков определяется двумя группами физико-географических факторов: климатическими и ландшафтными [3, 4]. Основными из климатических факторов являются: атмосферные осадки, испарение, температура воздуха и др. «В формировании дождевых паводков главная роль принадлежит атмосферным осадкам» [4, с. 23]. К ландшафтным факторам относятся почвенные характеристики водосбора, геологическое строение речного бассейна, растительность и рельеф [3, 4]. Таким образом, для расчета дождевого

стока необходимо иметь исчерпывающую информацию о количестве дождевых осадков, их распределении на водосборе и о ландшафтной структуре водосбора.

Геоинформационные ресурсы, используемые для моделирования

Цифровая модель рельефа. Решение задач моделирования процессов формирования стока требует создания адекватной цифровой модели рельефа (ЦМР) изучаемого речного бассейна.

ЦМР, используемая для моделирования стока и в других гидрологических приложениях, должна иметь достаточное пространственное разрешение для детального описания процессов формирования стока и быть гидрологически корректной. Качество исходной модели рельефа в значительной степени определяет ее применимость для решения гидрологических задач. В наибольшей степени предъявляемым в гидрологическом анализе требованиям отвечают ЦМР, созданные на основе алгоритма М.Хатчинсона. В настоящее время этот алгоритм реализован в пакете ArcGis как инструмент *Topo to Raster*. Главной особенностью процедуры интерполяции с помощью инструмента *Topo to Raster* является возможность использования полного набора данных о формах рельефа с топографических карт [5].

В последние годы важнейшим источником получения данных о рельефе становится дистанционное зондирование Земли. Свободно распространяемые модели рельефа, построенные по данным ДЗЗ, широко используются для решения гидрологических задач [5].

Независимо от источника данных, использованного для построения ЦМР, на ее основе выполняется схематизация речного бассейна в соответствии с требованиями расчетной гидрологической модели. Результатом схематизации является структурное деление территории на связанные водосборы и древовидный граф речной сети. Общепринятый алгоритм схематизации показан на рис. 1, а на рис. 2, а, б приведены модель речной сети и структурное деление бассейнов для р. Чарыш (ЦМР построена на основе топографических карт масштаба 1:100000) и для р. Майма (для построения ЦМР использованы данные улучшенной версии SRTM с размером ячейки 1 угловая секунда, ~30 м).

Помимо структурного деления речного бассейна и построения модели речной сети, при схематизации водосбора по ЦМР вычисляется ряд других гидрологически значимых характеристик: физические характеристики потоков и частных водосборов (подбассейнов) [6], а также величина поглощения солнечной радиации. Влияние рельефа на характер и величину поглощения солнечной радиации учитывается следующим образом: данные по нормальям к поверхности для каждого подбассейна разбиваются на группы (определяемые уклоном и азимутом), для каждой группы рассчитывается величина солнечной радиации различной степени осреднения (в зависимости от моделей).

Метеоданные. Количество осадков, выпадающих на водосбор, – один из главных факторов формирования стока. Точность его определения оказывает существенное влияние на качество прогнозов объема стока, расходов и уровней

воды в реках. На равнинной территории при условии достаточной плотности сети метеостанций оценка количества и пространственного распределения осадков может быть получена путем пространственной интерполяции [5].



Рис. 1. Алгоритм схематизации речной сети и выделения речных бассейнов по ЦМР

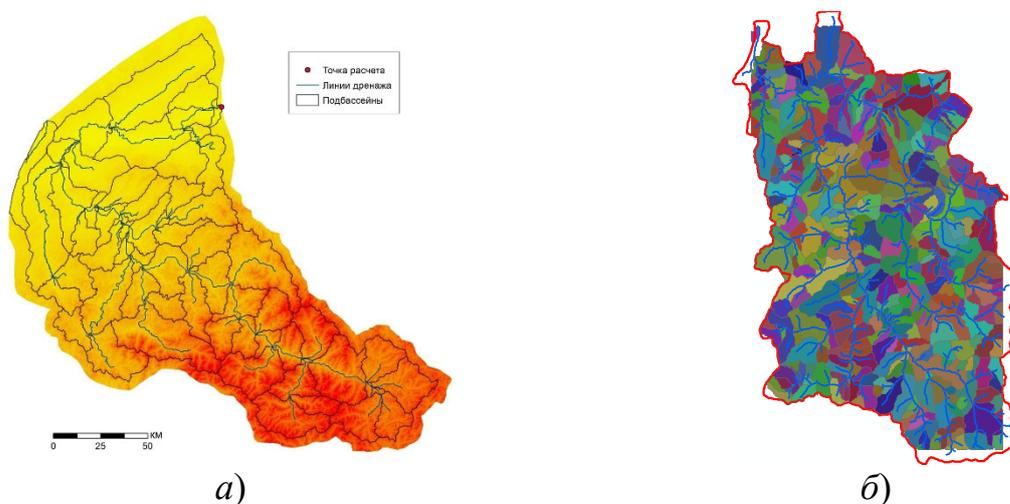


Рис. 2. Структура речной сети и деление на частные водосборы в бассейне:
а) р. Чарыш; б) р. Майма

Однако в условиях сложного рельефа существующая ограниченная наблюдательная сеть не учитывает неоднородности распределения осадков. Для решения проблемы определения количества осадков в районах со сложным рельефом могут использоваться данные дистанционного зондирования земли. Данные ДДЗ, доступные с конца 1970-х годов, стали дополнительными или альтернативными источниками пространственно-распределенных метеоданных [7]. Доступные наборы данных об осадках с координатной привязкой различаются по размеру области покрытия, пространственному и временному разрешению, по источникам и методам получения. Глобальные и континентальные наборы данных предоставляют информацию об осадках в большой области и охватывают большой период времени, однако в них отсутствует высокое пространственное разрешение, необходимое для исследований в масштабе региона или водосбора. Данные высокого разрешения обычно доступны только на уровне страны или охватывают определенный географический регион [8].

В последнее время предприняты усилия по объединению различных наборов данных для достижения лучших результатов.

Из множества доступных данных [7–11] для определения количества осадков, выпавших в бассейне, использован набор данных PERSIANN-CDR [11, 12]. PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks – Climate Data Record) обеспечивает оценки суточных осадков на сетке $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ для полосы $60^\circ\text{N}–60^\circ\text{S}$ за период с 1.01.1983 г. по настоящее время. Система PERSIANN, разработанная Центром гидрометеорологии и дистанционного зондирования (CHRS) Калифорнийского университета в Ирвине (UCI), использует алгоритмы нейронной сети и аппроксимацию данных наблюдений для вычисления оценки интенсивности дождя на каждом пикселе инфракрасного яркостного температурного изображения, полученного с геостационарных спутников. Другие доступные наборы данных ДДЗ имеют либо худшее пространственное разрешение, либо не покрывают территорию исследования, либо не поддерживаются в настоящее время.

Рис. 3, *а* иллюстрирует распределение осадков на водосборе р. Чарыш на 1.06.2000 г. Для сравнения на рис. 3, *б* показано распределение осадков, рассчитанное методом обратных взвешенных расстояний по данным с суточным разрешением пяти метеостанций сети Росгидромет.

Сравнение рис. 3, *а* и 3, *б* показывает, что интерполяция данных наблюдений по территории бассейнов дает сглаженную картину, не отражающую мезомасштабные неоднородности распределения осадков.

Рис. 4, *а* и 4, *б* позволяют сравнить количество осадков, вычисленное по данным PERSIANN-CDR, с данными метеостанции, расположенной приблизительно в центре водосборного бассейна (ГМС с. Чарышское).

Полученные результаты (рис. 4, *а*, *б*) не позволяют сделать вывод о существовании связи между данными наблюдений на отдельной метеостанции и данными ДДЗ, вычисленными с учетом их пространственного распределения по площади водосбора.

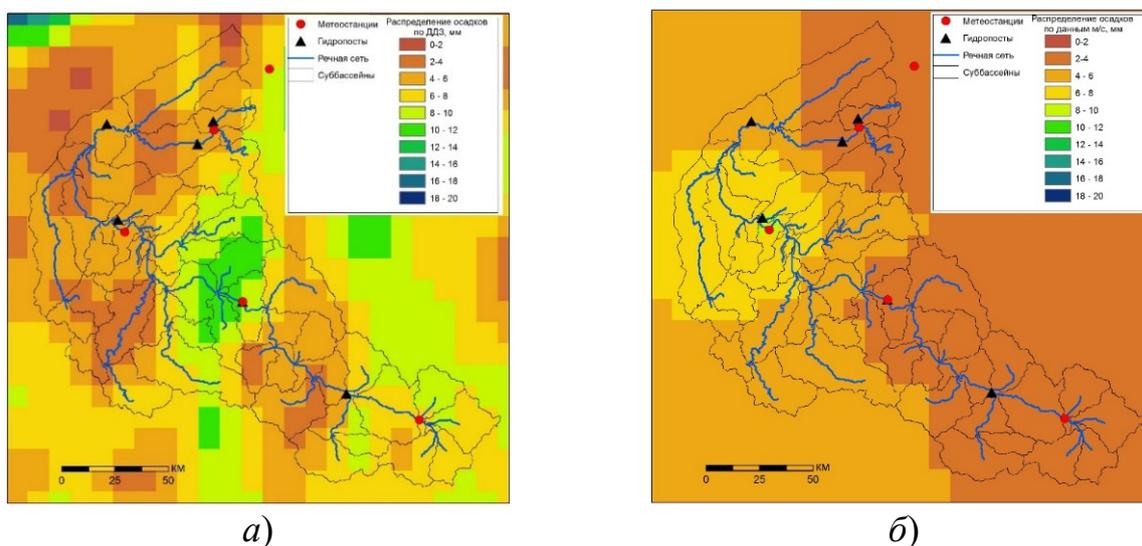


Рис. 3. Пример распределения осадков на 1.06.2000 г.:
 а) PERSIANN-CDR; б) интерполяция данных метеостанций

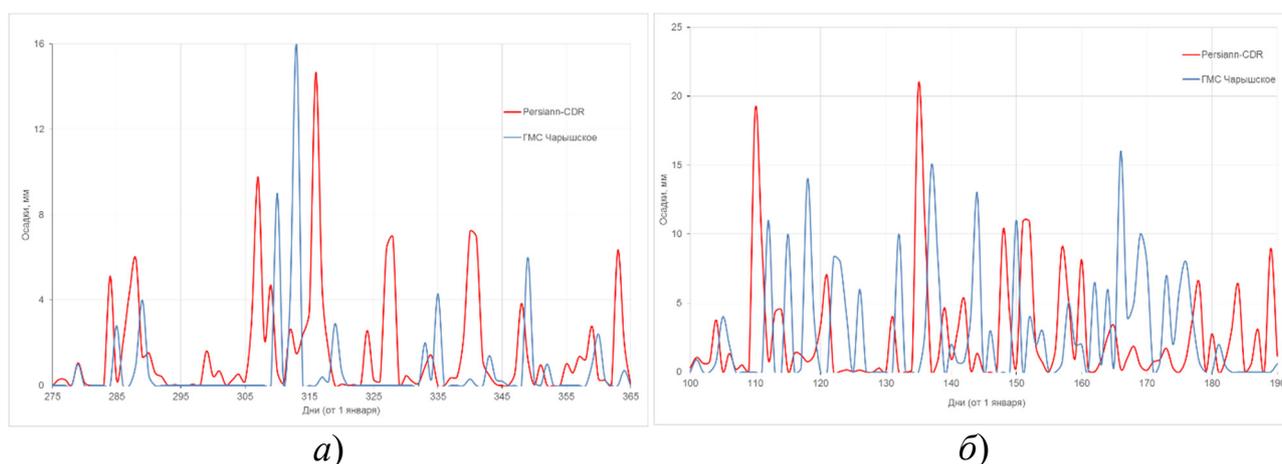


Рис. 4. Динамика количества осадков на водосборном бассейне р. Чарыш:
 а) осень-зима 2008 г.; б) весна-лето 2009 г.

Механический состав почвы и растительность. Состав почвы определяет интенсивность впитывания и фильтрации влаги. В настоящее время для территории России существует несколько доступных источников почвенных карт [13–15], в том числе почвенная (масштаб 1:1600000) и ландшафтная карты (с почвенным компонентом, масштаб 1:500000) Алтайского края [16, 17]. Источниками информации для задания почвенно-гидрологических характеристик разных типов почв, определяемых по почвенной карте, могут служить региональные справочники агро-гидрологических свойств почв, отсутствующие в свободном доступе, или данные полевых измерений. Поэтому для определения механических свойств почвы рассмотрена возможность использования глобальной почвенной базы данных Harmonized World Soil Database (HWSD) [18, 19].

Распределение типов почв по данным HWSД на территории РФ соответствует почвенной карте масштаба 1:2500000, разработанной под руководством М.А. Глазовской. Результирующая карта базы HWSД представлена растровым файлом с пространственным разрешением 1×1 км, показывающим распределение почвенных ареалов, и базой данных в формате MS Access. Использование уникальных идентификаторов позволяет связать базу данных с растровой картой для отображения состава параметров для каждого типа почв, в том числе, текстурного и гранулометрического класса. На рис. 5, а приведена карта текстуры почвы в бассейне р.Чарыш, построенная по HWSД, на рис. 5, б – карта инфильтрационной способности грунтов, рассчитанная с учетом механического состава почвы.

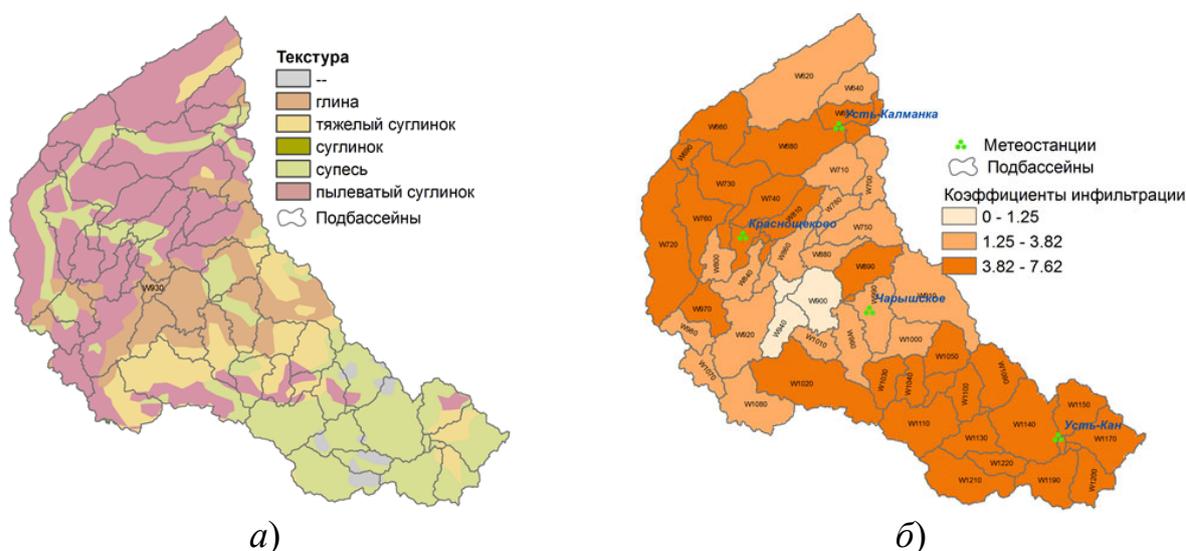


Рис. 5. Характеристики почв бассейна р. Чарыш:

а) карта текстуры почв; б) карта средних минимальных коэффициентов инфильтрации, мм/ч

Как следует из рис. 5, б, коэффициент инфильтрации на водосборе меняется в диапазоне от 0 до 11,43 мм/ч. Очевидно, что эти рассчитанные значения не дают точных представлений о распределении коэффициента фильтрации на водосборе. Однако их можно использовать как начальные приближения параметров для оценки поверхностных и грунтовых (базисных) стоков.

Характеристики растительности и ландшафтов, необходимые для оценки параметров, задавались на основе ландшафтной карты и карты растительности Алтайского края [16, 17].

Результаты

Подготовленные пространственные данные были включены в две компьютерные модели: программный комплекс HEC-HMS [20] и модель, разработанную в ИВЭП СО РАН.

Система гидрологического моделирования (НЕС-HMS) предназначена для моделирования гидрологических процессов дренажных водосборных систем. Программное обеспечение включает в себя множество традиционных процедур гидрологического анализа, а также предоставляет расширенные возможности для моделирования стока с привязкой к сетке с использованием линейного квазираспределенного преобразования стока.

С помощью НЕС-HMS с использованием подготовленных данных проведен расчет дождевого стока р. Чарыш (рис. 6, а).

Аналогичный подход был применен при создании компьютерной модели стока для бассейна р. Чарыш, математический аппарат которой описан в [21]. Разработанная модель использует в качестве расчетных элементов элементарные водосборы. Каждый элементарный водосбор разбивается на 2 расчетных элемента (левый и правый), которым соответствует один речной сегмент. Связь речных участков (и соответственно водосборов) друг с другом определяется в виде графа. Модель использует законы сохранения массы, учитывает пространственную неоднородность процессов формирования стока и детализацию процессов трансформации стока по вертикали (поверхностный, подповерхностный и грунтовый сток). Подобный тип моделей используется в большинстве современных систем, моделирующих процессы формирования стока [1, 19, 22].

С использованием этой модели проведен расчет стока р. Чарыш (рис. 6, б).

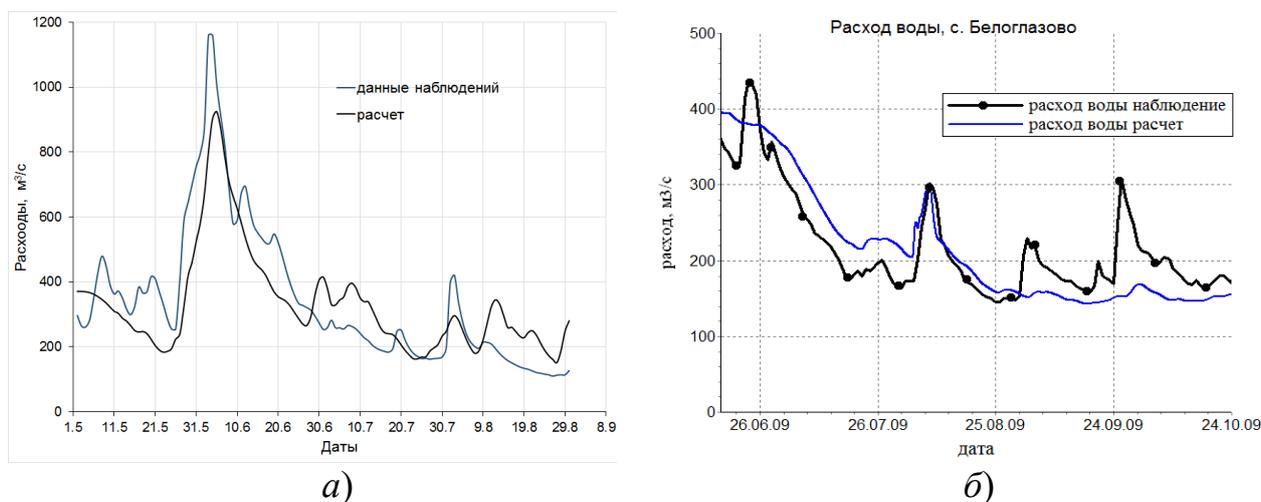


Рис. 6. Результаты расчета формирования дождевого стока на водосборе р. Чарыш:

а) модель НЕС-HMS (2014 г., с. Усть-Камышенка; б) модель ИВЭП (2009 г., с. Белоглазово)

Выводы

1. Рассмотрены основные факторы, влияющие на формирование стока. Представлена схема подготовки ЦМР и создание на ее основе гидрологической

структуры водосборного бассейна. Проанализированы источники данных по растительности и механическому составу почв.

2. Проведено сопоставление двух способов учета осадков: данные по метеостанциям; набор данных Persiann-CDR.

3. Представлены результаты расчетов стока с водосбора р. Чарыш по двум компьютерным моделям. Результаты расчета сопоставлены с натурными данными. Результаты расчетов показывают работоспособность рассмотренных моделей стока с водосбора.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. – М.: ИВП РАН, 2018. – 296 с.

2. Руководство по гидрологической практике. Том II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов – ВМО, 2008. Перевод на русский, 2012. – 324 с.

3. Бефани Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 183 с.

4. Коробкова Г.В. Анализ дождевого стока. – Л.: Наука, 1990. – 128 с.

5. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. – Пермь, 2017. – 148 с.

6. СТО ГГИ 52.08.40-2017. Определение морфометрических характеристик водных объектов суши и их водосборов с использованием технологии географических информационных систем по цифровым картам Российской Федерации и спутниковым снимкам / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – СПб, ООО «РПЦ Офорт», 2017. – 148 с.

7. Lockhoff M., Zolina O., Simmer C., Schulz J. Representation of Precipitation Characteristics and Extremes in Regional Reanalyses and Satellite- and Gauge-Based Estimates over Western and Central Europe. // *Journal of Hydrometeorology*. – 2020. – V. 20(6). P.1123–1145. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0200.1>.

8. Gampe D, Ludwig R. Evaluation of Gridded Precipitation Data Products for Hydrological Applications in Complex Topography // *Hydrology*. – 2017. – 4(4):53. <https://doi.org/10.3390/hydrology4040053>.

9. Chen J, Li Z, Li L, Wang J, Qi W, Xu C-Y, Kim J-S. Evaluation of Multi-Satellite Precipitation Datasets and Their Error Propagation in Hydrological Modeling in a Monsoon-Prone Region // *Remote Sensing*. – 2020. – V.12(21):3550. <https://doi.org/10.3390/rs12213550>.

10. Centella-Artola A., Bezanilla-Morlot A., Taylor M. A., Herrera D.A., Martinez-Castro D., Gouirand I., Sierra-Lorenzo M., Vichot-Llano A., Stephenson T., Fonseca C., Campbell J., Alpizar M. Evaluation of Sixteen Gridded Precipitation Datasets over the Caribbean Region Using Gauge Observations // *Atmosphere*. – 2020. – 11(12):1334. <https://doi.org/10.3390/atmos11121334>.

11. Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS). Data Portal. [Электронный ресурс]. – URL: <http://chrs.web.uci.edu>.

12. Nguyen P., Shearer E., Tran H., Ombadi M., Hayatbini N., Palacios T., Huynh P., Braithwaite D., Updegraff G., Hsu K., Kuligowski B., Logan W., Sorooshian S. The CHRS Data Portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Sci Data*. 2019 Jan 8;6:180296. DOI: 10.1038/sdata.2018.296.

13. Почвенная карта РСФСР [Карты] / ВАСХНИЛ; Почвен. ин-т им. В. В. Докучаева; Госагропром РСФСР; гл. ред. В. М. Фридланд. – М.: ГУГК, 1988. – 16 с.

14. Информационная система Почвенно-географическая база данных России. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://soil-db.ru/> (дата обращения 15.03.2019).
15. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://egrpr.soil.msu.ru/download.php> (дата обращения 15.03.2019).
16. Алтайский край: Атлас. Т. 1. – М. – Барнаул, 1978. – 222 с.
17. Ландшафтная карта Алтайского края [Карты] / ИВЭП СО РАН; под науч. рук. Ю. И. Винокурова. – Барнаул. – ИВЭП СО РАН, 2016. – 1 к. (2 л.).
18. Почвенная база данных Harmonized World Soil Database (HWSD). – [Электронный ресурс]. – URL: <https://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML>.
19. Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. Модель формирования стока для бассейна р. Амур // Водные ресурсы. – 2018. – № 2(45) – С. 121–132.
20. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, hydrologic Engineering Center, 2000. – URL: [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual\(CPD-74B\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual(CPD-74B).pdf).
21. Кудишин А.В. Модель формирования дождевого стока на примере реки Майма (Алтайский край) // Известия АО РГО. – 2019. – №4(55). – С.77–81. DOI: 10.24411/2410-1192-2019-15508.
22. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. // Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series, 1999. – № 105. – 88 p.

© О. В. Ловцкая, А. В. Кудишин, А. Б. Голубева, 2021