

УДК 528.88+556

Рыбников Петр Андреевич

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией геоинформационных
и цифровых технологий в недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58;
доцент кафедры инженерной экологии,
Уральский государственный
горный университет,
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
e-mail: ribnikoff@yandex.ru

Смирнов Александр Юрьевич

младший научный сотрудник
лаборатории геоинформационных и цифровых
технологий в недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
преподаватель кафедры геодезии и кадастров,
Уральский государственный
горный университет
e-mail: alexsm94@gmail.com

**ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОГО
ОПИСАНИЯ Понижений РЕЛЬЕФА
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ
ВОДОСБОРНЫХ БАССЕЙНОВ****Аннотация:*

Ежегодно в мире происходят техногенные катастрофы на гидротехнических сооружениях, вызванные ошибками при проектировании и недостаточным учетом влияния природных факторов (ливневых дождей, наводнений, обильного снеготаяния и т.д.). Проблема может быть решена на этапе проектирования путем предварительной подготовки исходных данных цифровых моделей рельефа, применяемых при моделировании в геоинформационных системах. Было установлено, что использование метода определения оптимального пути для заполнения бессточковых впадин, предложенного L. Wang и H. Liu, обеспечивает высокую точность вычисления границы водосбора речных бассейнов и может применяться при определении параметров речной сети, а также получения данных о величине поверхностного стока.

Ключевые слова: определение водосбора, направление стока, определение речной сети, гидрология, цифровая модель рельефа, DEM, SAGAGIS.

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.174

Rybnikov Petr A.

Candidate of Geological
and Mineralogical Sciences,
Head of the Laboratory of Geoinformation and
Digital Technologies in Subsoil Use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.;
Associate Professor,
Department of Environmental Engineering,
Ural State Mining University,
620144 Ekaterinburg, 30 Kuibysheva Str.
e-mail: ribnikoff@yandex.ru

Smirnov Alexander Yu.

Junior Researcher,
Laboratory of Geoinformation
and Digital Technologies in Subsoil Use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS;
Lecturer,
Department of Geodesy and Cadastres,
Ural State Mining University
e-mail: alexsm94@gmail.com

**ECULIARITIES IN DIGITAL
DESCRIPTION OF TOPOGRAPHIC LOW
WHILE MODELING THE SURFACE
OF THE DRAINAGE BASINS***Abstract:*

Every year in the world, man-made disasters occur at hydraulic structures caused by design errors and insufficient consideration of the influence of natural factors (heavy rains, floods, heavy snowmelt, etc.). The problem can be solved at the design stage by preliminary preparation of the initial data of digital elevation models used while modeling in geographic information systems. It was established that the use of the method of determining the optimal path for filling the drainage depressions, proposed by L. Wang and H. Liu, provides high accuracy in calculating the boundary of the catchment area of river basins and can be used in determining the parameters of the river network, as well as obtaining data on the value of surface runoff.

Keywords: water catchment determination, flow direction, river network determination, hydrology, digital elevation model, DEM, SAGA GIS.

* Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН по теме № 0328-2019-0005

Введение

Разведка новых месторождений, проектирование и эксплуатация горных предприятий требует учета гидрологических и гидрогеологических особенностей региона. В настоящее время мероприятия по разведке и добыче полезных ископаемых в значительной степени связаны с месторождениями со сложными гидрогеологическими условиями [1]. Актуальными остаются вопросы экологического характера: исследование поведения загрязняющих компонентов и путей их миграции, влияние на окружающую среду, биологическое разнообразие осваиваемого региона и т.д. [2, 3].

Помимо выполнения функций регуляции стока, гидротехнические сооружения часто используются для отстаивания и последующего хранения одного из видов отходов горного и металлургического производства – хвостов. Основная задача хвостохранилищ – создание благоприятных условий для отстаивания суспензии под действием силы тяжести, а также защита окружающей среды от ее воздействия. Зачастую для снижения затрат горно-обогатительных и металлургических предприятий при строительстве дамбы используются крупные фракции материала хвостов, а увеличение крутизны склона создает серьезные предпосылки для развития процессов разрушения дамбы хвостохранилища. Данная проблема особенно актуальна для Урала (и Свердловской области, в частности) как региона с развитым горным и металлургическим производством, в котором находится большое число крупных хвостохранилищ (г. Качканар, Нижний Тагил, Каменск-Уральский, Краснотурьинск и др.).

Большая часть аварийных случаев на хвостохранилищах в последние десятилетия связана с аномальными погодными условиями: продолжительными дождями, обильным снеготаянием, ураганами и т.д. [4, 5, 6]. Моделирование водного режима бассейнов подземного и поверхностного стока позволяет прогнозировать объемы аномальных притоков [7]. Повышение детализации таких моделей позволит повысить точность прогнозов и адекватность проектных решений.

Развитие геоинформационных технологий способствует появлению прикладных модулей геоинформационных систем (ArcHydroTools, Freewat и др.) и программных продуктов (MODFLOW, StreamCuda 2D и др.), позволяющих использовать информацию о земной поверхности для решения гидрологических и гидрогеологических задач [8]. Эти модули способны ранжировать речную сеть, моделировать направление стока, определять границы водосборных бассейнов, основные физические параметры водотоков и т.д. Несмотря на изученность используемых в таких модулях алгоритмов, наиболее сложным для решения задач вопросом остается крайняя чувствительность к задаваемым параметрам модели [9]. Небольшое изменение пороговых значений зачастую существенно меняет свойства модели [10, 11].

Для целей моделирования требуются данные о поверхности рельефа больших площадей. Зачастую не на всю территорию исследуемого района имеются топопланшеты нужного масштаба. Выполнение топографической съемки на такой площади неоправданно дорого, поэтому для этих целей используются цифровые модели рельефа (ЦМР), получаемые способами дистанционного зондирования Земли. Выбор ЦМР для моделирования крайне важен, поскольку именно от ее качества зависит корректность работы вычислительных алгоритмов [12]. Наличие большого числа ЦМР, полученных по результатам дистанционного зондирования Земли и доступных для бесплатного использования, позволяет частично решить проблему с отсутствием «традиционной» картографической информации, однако требуется обязательная предобработка таких данных [9].

Выбор алгоритма заполнения впадин

Базовым этапом подготовки модели для моделирования гидрологических процессов является коррекция ЦМР. В таких моделях практически всегда содержатся понижения рельефа, образующие бессточные области [13]. Часть из них не является

естественными элементами рельефа (озерами, прудами и т.д.), а представляет собой артефакты, возникшие в силу свойств разрешающей способности измерительных приборов, используемых при дистанционном зондировании Земли.

Существует достаточное количество подходов к решению проблемы заполнения понижений. Например, существуют методы, основанные на последовательном искусственном повышении высотных отметок узлов ячеек до тех пор, пока не станет возможным сток строго вниз по склону при соблюдении условия, что сток не вернется в исходную ячейку (не окажется замкнутым) [14].

В других случаях применяется размытие значений ЦМР при каждой итерации для уменьшения количества и размеров таких впадин, однако такие методы требуют больших затрат на время исполнения алгоритма и сложны в реализации без ущерба для релевантности исходной модели [15].

Наиболее известным и зарекомендовавшим себя в практике гидрологического моделирования является метод, предложенный L. Wang и H. Liu [16]. Данный метод качественно отличается от предыдущих благодаря способности одновременного определения «за один проход» как направления стока, так и пространственного положения водоразделов. Это становится возможным благодаря тому, что в нем используется алгоритм поиска потоков с наименьшими затратами (решение задачи оптимального пути в теории графов). Под наименьшими затратами в данном случае понимается получение множества выходов на границе ЦМР и нахождение оптимального пути от каждой внутренней ячейки модели, при котором результирующая высота этой ячейки будет минимальна, что позволяет минимизировать вмешательство в исходные данные.

Автоматизированное извлечение границы водосбора

Для реализации автоматизированного извлечения границы водосбора выбрана геоинформационная система SAGAGIS, в состав которой по умолчанию включены инструменты гидрологического моделирования, в том числе алгоритм, реализованный L. Wang и H. Liu. Однако для подобных целей также часто используется ArcHydroTools-модуль для коммерческой ГИС ArcGIS, не уступающий по функциональному наполнению вышеуказанной геоинформационной системе [9]. Данные модули являются надстраиваемыми приложениями, обрабатывающими данные, содержащиеся в слоях ГИС.

Заполнение понижений ЦМР необходимо выполнять в первую очередь, поскольку данный алгоритм является предпроцессинговой функцией, что неизбежно повлияет на корректность последующих этапов моделирования. Для этого была выполнена геопроектинговая функция «*FillSinks (WangLiu)*», результатом выполнения алгоритма которой является grid-файл, с отсутствующими бессточковыми участками. Водные бассейны, добавленные отдельным shape-файлом, не сглаживаются и учитываются при вычислении поверхности в качестве структурных линий.

На следующем этапе традиционно рассчитывают векторы направления стока для каждой ячейки. Для этого использовалась функция «*FlowAccumulation (Top-Down)*». Также был выбран режим детерминистического интерполирования в 8-ми направлениях (рис. 1), что соответствует описанной L. Wang и H. Liu методике [16].

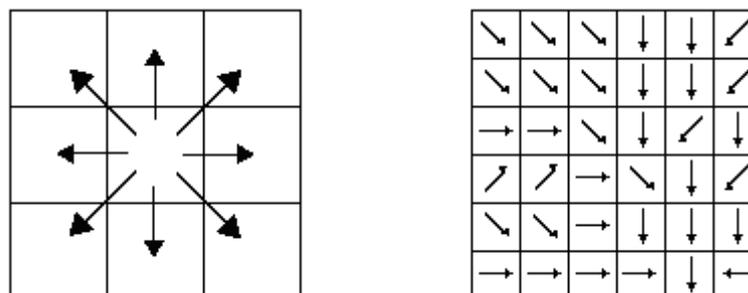


Рис. 1 – Методика расчета направления стока в 8-ми направлениях

Поскольку, как было указано выше, функция заполнения впадин также создает границы водоразделов, а векторы направления стока были получены на предыдущем шаге, становится возможным получение схемы речной сети. Функция «*ChannelNetwork*» позволяет не только создать речную сеть, но также автоматически ранжирует гидрологический порядок водотоков, что дополнительно облегчает дальнейший анализ данных (рис. 2).

Последним этапом является определение границы водосбора с использованием динамической функции «*UpslopeArea*». Существует диаметрально противоположная функция «*DownslopeArea*», выполняющая обратную задачу: она определяет все ячейки ниже по течению, получающие сток от конкретной точки.

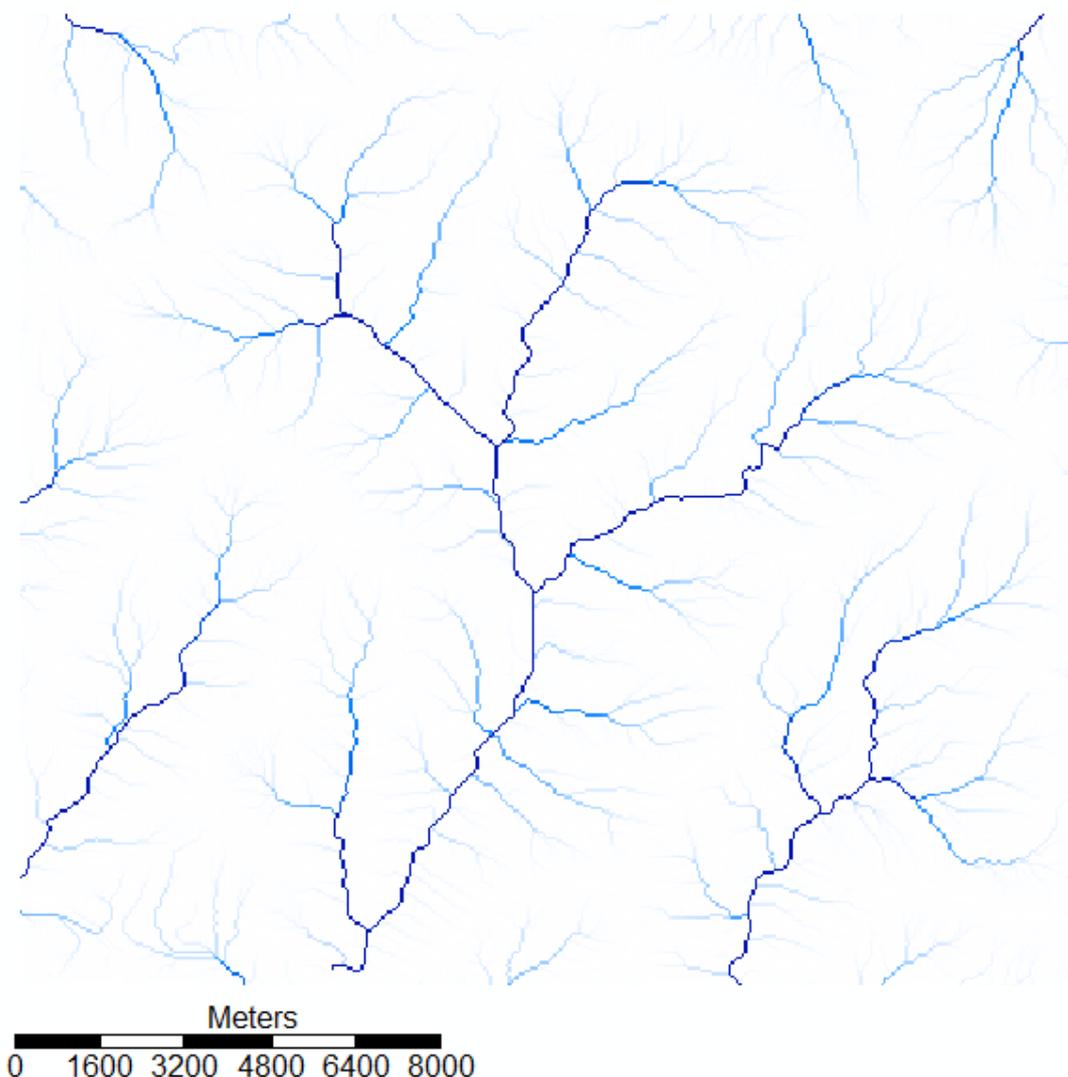


Рис. 2 – Результат моделирования речной сети

Заключение

Моделирование поверхности водосборных бассейнов является важным шагом для получения количественных и качественных характеристик бассейнов. Комплексное гидрологическое и гидрогеологическое моделирование на стадиях проектирования, эксплуатации и консервации объектов горных и металлургических предприятий позволяет дать конкретные рекомендации по предотвращению развития возможных аварийных ситуаций.

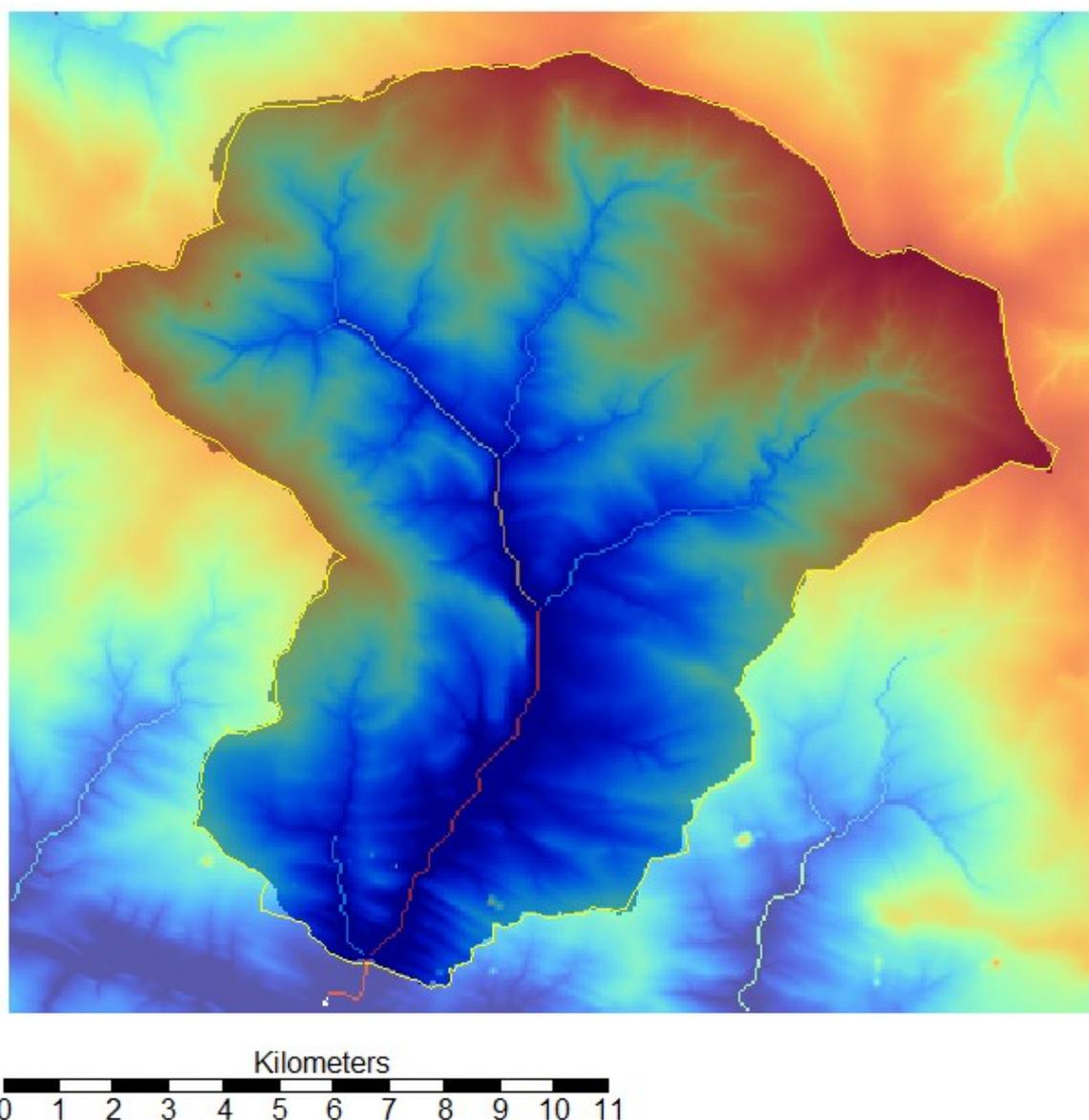


Рис. 3 – Водосбор речного бассейна (затененная область),
полученный способом моделирования.
Желтой линией показана граница водосбора, извлеченная из топопланшетов

Мировой опыт аварий на хвостохранилищах свидетельствует о серьезной опасности для населения и окружающей среды: излив суспензии хвостохранилищ, помимо человеческих жертв, разрушения зданий и сооружений, оставляет после себя вытянутые «языки» загрязненных участков с повышенной концентрацией опасных элементов[5]. Основными причинами аварий в последние десятилетия служили процессы переливания и просачивания через тело дамбы, вызванные аномальным количеством осадков (продолжительные дожди, обильное снеготаяние и т.д.) и конструктивными ошибками при проектировании, не учитывающими данные факторы в полной мере. Моделирование поверхности водосборных бассейнов является одним из базовых шагов, создавая основу для численных геофильтрационных и геомиграционных моделей.

Наличие большого числа автоматизированных методов получения основных характеристик водосборных бассейнов свидетельствует о достаточной изученности данной проблемы. Большое внимание уделяется подбору пороговых значений параметров таких алгоритмов, наилучшим образом подходящих для того или иного типа рельефа.

Для оценки корректности использованного алгоритма и качества главных показателей модели было выполнено сличение с границей водосбора, оцифрованной с крупномасштабных топографических карт с сечением рельефа через 1 м (рис. 3). Для исключения погрешности деформации бумаги картографический материал был трансформирован методом аффинного преобразования, а пространственная привязка осуществлялась в прямоугольной системе координат (СК-42, Зона 7) с использованием программных продуктов CredoTransform и MapInfo.

Сопоставление границ водосбора, полученных двумя разными способами, позволяет сделать вывод о достаточно высокой точности алгоритма, примененного в настоящей работе, и, как следствие, возможности его применения при гидрологическом моделировании поверхности водосборных бассейнов.

Немаловажную роль в точности определения границы водосбора играет качество цифровой модели рельефа (ЦМР). Методы съемки с использованием дистанционного зондирования Земли практически всегда приводят к появлению радиолокационных теней, которые, в свою очередь, вызывают появление артефактов и бесстоковых областей. Применение вышеописанного алгоритма позволяет минимизировать данную проблему. Цифровые модели рельефа позволяют получить информацию о поверхности Земли на больших территориях и частично решить проблему с отсутствием «традиционной» картографической информации.

Литература

1. Рыбникова Л. С. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Лёвихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников // Геохимия. - 2019. - №3. - С. 282-299.
2. Использование комплексных методов для оценки состояния окружающей среды в зоне влияния хвостохранилища / Л. Т. Крупская, О. А. Кириенко, Е. Л. Имранова, В. П. Зверева, Н. Г. Волубуева // Экологическая химия. - 2016. - № 3. - С. 158-162.
3. Assessment of vulnerability and control measures to protect the Salbarua ecosystem from hypothetical spill sites / Jaime Garfias, Hilario Llanos, Richard Martel, Javier Salas-Garcia, Luvina Bibiano-Cruz. // Environmental Science and Pollution Research. - 2018. - Vol. 25. - P. 26228-26245.
4. Рыбникова Л. С. Физико-химическая модель формирования подземных вод в районах затопленных медноколчеданных рудников Урала / Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. - № S37. - С. 584-595.
5. Shahid Azam Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years / Shahid Azam, Qiren Li. // Geotechnical News. - 2010. - Vol. 50. - P. 50-53.
6. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure / J.R. Owen, D. Kemp, E. Lebre, K. Svobodova, G. Perez Murillo // International Journal of Disaster Risk Reduction. - 2020. - Vol. 42. - 10 p.
7. Пьянков С. В. Методологические аспекты пространственного анализа формирования стока рек с использованием математико-картографического моделирования / С. В. Пьянков, В. Г. Калинин // Метеорология и гидрогеология. - 2009. - № 1. - С. 85-90.
8. Numerical Modeling of the Behavior of a Destructive Rain Flood on a Mountain River / E. S. Vasil'eva, A. I. Aleksyuka, P. A. Belyakova, T. A. Fedorova, V. V. Belikov // Water resources and the regime of water bodies. - 2019. - Vol. 46. - P. 43-55.
9. Arc Hydro Tools: Tutorial - New York: ESRI, 2011. - 189 p.
10. Girish Gopinath Automated extraction of watershed boundary and drainage network from SRTM and comparison with Survey of India toposheet / Girish Gopinath, T.V. Swetha, M. K. Ashitha // Arabian Journal of Geosciences. - 2014. - Vol. 7. - P. 2625 - 2632.

11. Determination of sensitivity of drainage morphometry towards hydrological response interactions for various datasets / Akshay Omprakash Jain, Tejaskumar Prakashchandra Thaker, Anil Kumar Misra, Anupam Kumar Singh, Priyanka Kumari // Environment, Development and Sustainability. – 2020. – 24 p.

12. Sefercik U. G. Country-scale discontinuity analysis of AW3D30 and SRTM Global DEMs: case study in Turkey / U. G. Sefercik, U. Gokmen // Arabian Journal of Geosciences. – 2019. – Vol. 12. – 11 p.

13. An effective depression filling algorithm for DEM-based 2-D surface flow modeling / D. Zhu, Q. Ren, Y. Xuan, Y. Chen, I. D. Cluckie // Hydrology and Earth System Sciences, 2013. – Vol. 17(2). – P. 495-505.

14. Garbrecht J. Digital elevation model issues in water resources modelling / J. Garbrecht, L. W. Martz // Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems. – 2000. – P. 1-28.

15. Planchon O. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models / O. Planchon, F. Darboux // Catena, 2002. – Vol. 46(2). – P. 159-176.

16. Wang L. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling / L. Wang, H. Liu // International Journal of Geographical Information Science, 2006. – Vol. 20(2). – P. 193-213.