

УДК 528.8 : 63

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОРРЕКЦИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА, ПОСТРОЕННЫХ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

А. И. Павлова¹, А. В. Павлов²

¹Новосибирский государственный университет экономики и управления,
630099, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: annstab@mail.ru
arginin@mail.ru

Выполнен анализ алгоритмов коррекции цифровых моделей рельефа, полученных по результатам дистанционного зондирования земной поверхности. Дана оценка точности глобальных цифровых моделей высот ASTER GDEM2, SRTM X-band, ALOS DMS, которая показала, что для различных условий рельефа (плоских, всхолмлённых и сильно расчленённых равнин) Новосибирской области наименьшие абсолютные и относительные ошибки имеют снимки ALOS DMS. Проведён сравнительный анализ алгоритмов, предложенных авторами L. Wang и H. Liu, O. Plantchon и F. Darboux, J. D. Pelletier, D. Tarboton в целях устранения артефактов на исходных космических снимках, связанных с локальными понижениями в рельефе (депрессиями, ямами). Получены наименьшие ошибки для различных условий местности с помощью алгоритма L. Wang и H. Liu.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, глобальные матрицы высот, геоморфометрический анализ, цифровое моделирование рельефа.

DOI: 10.15372/AUT20180503

Введение. Рельеф является одним из основных и устойчивых факторов развития геосистем, определяющим направление и интенсивность протекания физических и химических процессов на поверхности, микроклиматические особенности территории [1–3], оказывает существенное влияние на водный режим почв, формирование типов лесных местопроизрастаний [4], а также пространственное распространение почв и растительных сообществ [5], структуру сельскохозяйственных земель [6]. Поэтому в процессе ландшафтного анализа, районирования, оценки сельскохозяйственных земель, прогнозирования экзогенных процессов возникает необходимость количественного описания рельефа.

Основным источником информации для создания цифровых моделей рельефа служат глобальные цифровые модели высот (ГЦМВ), отличающиеся пространственным разрешением, характеристиками точности, стоимостью [7–9]. К числу доступных ГЦМВ относят следующие: ASTER GDEM (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Evaluation Model, США) [10, 11], SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission, США) [12–14], ALOS DSM (The Advanced Land Observing Satellite Digital Surface Model, Япония) [15, 16]. В настоящее время распространены улучшенные версии ГЦМВ: SRTM C-band и SRTM X-band. При этом ГЦМВ SRTM C-band покрывает территорию США космическими снимками с высоким пространственным разрешением 1'' (30 м), а весь земной шар — с более низким пространственным разрешением (90 м) [9].

Цифровые модели рельефа (ЦМР) часто представляют топографическую поверхность в виде регулярной GRID-модели, нерегулярной триангуляционной TIN-модели или в ви-

де горизонталей цифровой топографической карты [17]. Для гидрологического и геоморфометрического анализов наиболее широко применяются GRID-модели, представляющие собой растровые данные, каждый пиксел (ячейка) которых содержит информацию о высотах точек земной поверхности. Отличительные особенности этих моделей — относительно простое описание рельефа и удобство вычислительных операций с ячейками растра.

Однако на точность получения геоморфометрических характеристик (крутизны склонов, топографических индексов), построения моделей гидрологической и эрозионной сетей и модели направления поверхностного стока оказывают влияние не только качество исходных цифровых моделей высот, но и используемые алгоритмы цифрового моделирования. Современные ГЦМВ содержат большое количество артефактов (искажений), или топографических депрессий, связанных с понижениями или ямами, что приводит к отсутствию в ячейках растра высот точек земной поверхности. При этом на цифровых моделях рельефа более высокого пространственного разрешения отображается большее количество неровностей (шероховатостей) поверхности, вследствие чего и большее количество локальных понижений, чем на цифровых моделях более низкого пространственного разрешения. Это влечёт за собой ошибки, для устранения которых необходимо построение ЦМР, называемой в научной литературе «гидрологически корректной». Создание такой модели является необходимым и важным этапом геоморфометрического и гидрологического анализов.

Цель исследований заключалась в анализе методов коррекции цифровых моделей рельефа, полученных на основе данных дистанционного зондирования.

Материалы и методы исследований. Исследования выполнены на территории Новосибирской области, расположенной в центральной части материка Евразия на юго-востоке Западно-Сибирской низменности (от 53° до 58° с.ш., от 75° до 85° в.д.). Протяжённость Новосибирской области с запада на восток составляет более 600 км, с севера на юг — до 400 км, а площадь — 177,8 тыс. км² [18]. В работе использованы топографические карты масштаба 1 : 50000, 1 : 100000, данные дистанционного зондирования — глобальные цифровые модели высот ASTER GDEM2, SRTM X-band, ALOS DSM.

Усовершенствованный спутниковый радиометр ASTER GDEM2 позволяет выполнять съёмку в широтах от 83° ю.ш. до 83° с.ш., обладает возможностью стереоскопической съёмки земной поверхности вдоль полосы обзора спутника при использовании двух телескопов, сканирующих в ближнем инфракрасном диапазоне с отношением база/высота с пространственным разрешением 0,6 м. Однако реальное пространственное разрешение ASTER GDEM2 составляет примерно $1''$ (30 м) [10, 11].

Глобальная цифровая модель высот SRTM X-band покрывает обширную территорию между 60° с.ш. и 56° ю.ш., характеризуется высоким пространственным разрешением $1''$ (30 м) [12–14].

Глобальная цифровая модель высот ALOS представляет собой принципиально новый продукт, созданный в результате применения новых алгоритмов потоковой обработки данных со спутников ALOS в целях получения точных моделей рельефа с пространственным разрешением $1''$ (30 м). Снимки имеют размер 1° по широте и 1° по долготе [15, 16].

При использовании ГЦМВ существует необходимость подавления шумов, уменьшения ступенчатости изображения и корректировки ЦМР таким образом, чтобы она максимально совпадала с топографической (земной) поверхностью, часто называемой в зарубежной литературе цифровой топографической поверхностью (DTM — Digital Terrain Model) [2]. Известны различные алгоритмы сглаживания (фильтрации) для подавления шумов, подчёркивания границ или структурных особенностей объектов на изображении. Основная суть алгоритмов сглаживания сводится к изменению значений пиксела с учётом значений соседних пикселов в пределах скользящего окна (представляющего собой матрицы размера 3×3 , 5×5 пикселов и др.). Известный линейный алгоритм сглаживания (низкочастотный фильтр) является простым, но обладает недостатком, связанным с размытостью изобра-

жения и уменьшением контрастности между тёмными и светлыми участками на снимке. Различие распространённых нелинейных алгоритмов сглаживания (медианный, адаптивный, модальный и др.) заключается в вычислении значений пиксела в центре скользящего окна путём статистического анализа распределений значений соседних пикселов. Однако перечисленные алгоритмы сглаживания не позволяют корректировать ЦМР с учётом локальных понижений и особенностей топографической поверхности.

В связи с этим в данной работе использованы алгоритмы S. K. Jenson и J. O. Dormigue [19], O. Plantchon и F. Darboux [20], L. Wang и H. Liu [21], M. F. Hutchinson и J. C. Gallant [22]. Алгоритм, разработанный в [19], широко применяется в географических информационных системах и специализированных программах гидрологического анализа, например ArcHydro Tools, GRASS, TOPOZ. Суть алгоритма состоит в следующем: первоначально отыскиваются локальные понижения в пределах ячейки раstra и производится вычисление высоты для данной ячейки путём линейного интерполирования высот соседних ячеек. Это приводит к выравниванию высот в границах локального понижения и уменьшению общего количества понижений. На следующем этапе работы алгоритма осуществляется поиск ячеек раstra с более низкими высотами и установление направления стока алгоритмом D8 (Deterministic Eight Neighbor) [23]. Данные ячейки маркируются в качестве центра локальных понижений, относительно которых происходит выделение водосборных бассейнов. В местах смежных водосборных бассейнов выявляются точки «истечения» и интерполируются высоты точек. Временная сложность алгоритма обычно выражается с использованием нотации $O(N)$ (где N — общее количество ячеек GRID-модели, вычисляется по количеству строк и столбцов). В алгоритме предусмотрена возможность сохранения понижений без изменений исходных высот в том случае, если расхождение между исходной и вычисляемой высотами не превышает некоторого порогового значения. В качестве недостатка алгоритма следует отметить формирование горизонтальных поверхностей на месте локальных понижений, что может приводить к неверным результатам моделирования направления стока и сети водотоков.

Назначение алгоритма [20] заключается в получении результирующей матрицы высот с учётом порогового значения $\varepsilon(c, n)$, вычисляемого для каждого центра ячейки раstra (c) и соседей (n). Пороговое значение определяется на основе локального уклона поверхности, задаёт допустимое значение разности высот между соседними ячейками раstra и влияет на форму поверхности. В случае если $\varepsilon(c, n) = 0$, идентифицируются плоские поверхности; если $\varepsilon(c, n) > 0$, выделяются наклонные поверхности в сторону «точки выхода» понижения; при $\varepsilon(c, n) \leq 0$ формируются наклонные поверхности в противоположную сторону. Таким образом, полученное значение высоты для каждой ячейки моделируемой поверхности $W(c)$ будет определяться при выполнении условий [20]

$$\begin{cases} Z(c) \geq W(n) + \varepsilon(c, n) \Rightarrow W(c) = Z(c), \\ Z(c) > W(n) + \varepsilon(c, n) > Z(c) \Rightarrow W(c) = W(n) + \varepsilon(c, n), \end{cases} \quad (1)$$

где $Z(c)$ — значение высоты для центра ячейки раstra на исходной цифровой модели рельефа; $W(n)$ — значение высоты ячейки раstra моделируемой поверхности, вычисленное с учётом высот соседних ячеек раstra.

Особенность алгоритма заключается во включении в вычислительный процесс всех ячеек раstra, поэтому авторами не предусмотрена возможность сохранения отдельных локальных понижений, описывающих реальные топографические особенности территории, например ямы или депрессии. В данной работе изложены две версии алгоритма. Вычислительная сложность первой версии составляет $O(N^{1,5})$, а второй — $O(N^2)$. Однако при работе алгоритма используется 48 переменных, а рекурсивный поиск при определении на-

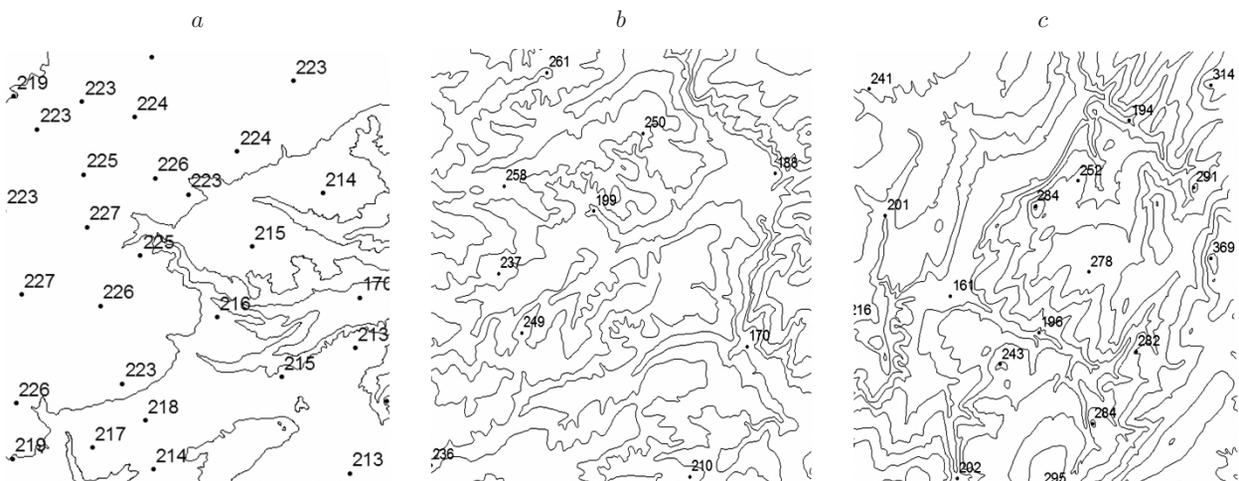
правления стока может осуществляться четырьмя вложениями, что приводит к низкой вычислительной способности алгоритма [24].

Для того чтобы улучшить вычислительную способность алгоритмов идентификации и устранения локальных понижений, в [21] был предложен алгоритм PFA (Priority-Flood Algorithm), реализующий новый концептуальный подход, при котором отыскивается оптимальное направление поверхностного стока путём пространственного моделирования на отдельных частях водораздела. При этом заполнение локальных понижений выполняется с учётом высот восьми соседних ячеек раstra. Авторы реализовали алгоритм для массива данных логического типа с использованием специального словаря, формируемого из значений высот ЦМР. Временная сложность алгоритма составляет порядка $O(N \log^2 k)$ (где k — количество уровней рельефа) [21, 25].

Алгоритм ANUDEM [22] относится к адаптивному локальному интерполятору. Назначение алгоритма состоит в интерполировании поверхности, которая характеризует особенности стока и дренажной сети территории водосборного бассейна. Специфика алгоритма заключается в моделировании с учётом отметок горизонталей, высот характерных точек местности и водных поверхностей.

Большинство современных алгоритмов заполнения локальных понижений основано на моделировании направления стока, при котором рассчитывается одно направление стока для ячейки раstra, например алгоритмы Rho4 (Random Four Neighbor)/Rho8 (Random Eight Neighbor) [26], D8 [25], Lea [27], $D\infty$ [28]. Известны и более современные алгоритмы заполнения локальных понижений для коррекции цифровой модели рельефа, например M. She [29]. Однако эти алгоритмы реализованы в авторских версиях программ или коммерческих географических информационных системах.

Результаты исследований. В данной работе выполнена оценка точности ГЦМВ ASTER GDEM2, SRTM X-band, ALOS для различных условий рельефа Новосибирской области. Были выбраны участки, расположенные на плоской равнине в левобережье реки Оби Приобского плато, холмистой равнине, сильно расчленённой равнине Предсалаирья (см. рисунок). Оценка точности производилась путём сравнения высот точек на топографических картах и ГЦМВ при вычислении абсолютных ошибок (минимальной, максимальной, средней), а также средней квадратической ошибки (СКО). Данные точки служили в качестве опорных и были выбраны случайным образом.



Изображение рельефа равнин Новосибирской области: *a* — плоской, *b* — всхолмлённой, *c* — сильно расчленённой (точки — отметки высот земной поверхности, извилистые линии — горизонтали)

Таблица 1

| Рельеф равнин | ГЦМБ | Количество точек | Абсолютные ошибки | | | Стандартное отклонение | СКО |
|------------------------|----------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------|---------------------------|-------|
| | | | мини- мальная | макси- мальная | средняя | | |
| Плоские | ASTER GDEM2 | 970 | 0,76 | 5,56 | 1,43 | 0,74 | 3,31 |
| | SRTM X-band | 970 | 0,45 | 3,67 | 1,36 | 0,61 | 0,52 |
| | ALOS DSM | 970 | 0,24 | 1,50 | 0,54 | 0,32 | 2,44 |
| Всхолмлѐнные | ASTER GDEM2 | 1100 | 1,83 | 6,54 | 5,71 | 3,43 | 8,92 |
| | SRTM X-band | 1100 | 1,35 | 5,23 | 3,50 | 1,28 | 6,25 |
| | ALOS DSM | 1100 | 0,68 | 3,66 | 1,44 | 0,78 | 4,79 |
| Сильно расчленѐнные | ASTER GDEM2 | 850 | 4,18 | 12,12 | 11,80 | 5,61 | 12,71 |
| | SRTM X-band | 850 | 2,14 | 7,463 | 6,26 | 6,60 | 7,80 |
| | ALOS DSM | 850 | 1,15 | 5,76 | 4,60 | 2,5 | 4,82 |

Наибольшие ошибки определения точности высот получены с помощью алгоритма ASTER GDEM2. Абсолютные величины ошибок варьируются от 0,76 до 11,80 м. (табл. 1). При этом СКО высот точек плоских равнинных участков составила 5,44 м, а для горных территорий — 12,71 м. Более низкие показатели оценки точности были получены при использовании алгоритма SRTM X-band. Абсолютные минимальные, максимальные и средние значения ошибок изменяются в зависимости от условий рельефа и в целом ниже, чем для ASTER GDEM2 (табл. 2). Наименьшими ошибками оценки точности характеризуется ALOS DSM, средние величины абсолютных ошибок колеблются от 0,54 до 3,60 м, а СКО составляют менее 4,0 м. В связи с этим для формирования цифровой модели рельефа территории Новосибирской области использовались космические снимки ALOS DSM.

Для исследований рельефа были созданы цифровые модели с помощью различных методов заполнения депрессий и локальных понижений. Выполнена оценка точности полученных гидрологически корректных цифровых моделей рельефа для плоских, всхолмлѐнных и сильно расчленѐнных равнин (см. табл. 2).

Результаты оценки точности показали, что более низкие значения ошибок определены при использовании метода ANUDEM. Величины средних абсолютных ошибок колеблются от 0,12 до 0,24 м; стандартное отклонение изменяется от 0,22 до 0,37 м. Средняя квадратическая ошибка наблюдается для равнинных участков (менее 0,30 м); а максимальная — для сильно расчленѐнных равнин (0,58 м). В целом метод характеризуется хорошими показателями оценки точности. Это объясняется использованием в качестве исходных данных топографической основы в виде горизонталей, высот точек земной и водной поверхностей.

Таблица 2

| Рельеф равнин | Алгоритм | Количество точек | Абсолютные ошибки | | | Стандартное отклонение | СКО |
|---------------------|----------|------------------|-------------------|--------------|---------|------------------------|-------|
| | | | минимальная | максимальная | средняя | | |
| Плоские | Jenson | 970 | 0,16 | 2,56 | 1,36 | 0,55 | 2,46 |
| | Planchon | | 0,56 | 3,15 | 1,43 | 0,61 | 3,31 |
| | PFA | | 0,15 | 2,74 | 1,24 | 0,44 | 1,52 |
| | ANUDEM | | 0,002 | 2,51 | 0,12 | 0,22 | 0,28 |
| Всхолмлённые | Jenson | 110 | 2,15 | 8,67 | 6,18 | 4,16 | 8,92 |
| | Planchon | | 1,83 | 6,54 | 5,71 | 3,43 | 8,76 |
| | PFA | | 1,35 | 5,72 | 3,50 | 1,28 | 3,25 |
| | ANUDEM | | 0,004 | 5,23 | 0,17 | 0,25 | 0,44 |
| Сильно расчленённые | Jenson | 850 | 4,19 | 17,15 | 13,22 | 6,16 | 12,75 |
| | Planchon | | 4,18 | 12,12 | 11,80 | 5,61 | 10,78 |
| | PFA | | 2,14 | 10,46 | 4,26 | 2,60 | 4,80 |
| | ANUDEM | | 0,006 | 8,99 | 0,24 | 0,37 | 0,58 |

Сравнительный анализ алгоритмов Jenson, Planchon, PFA показал, что наименьшие абсолютные и относительные ошибки были получены при применении алгоритма L. Wang и H. Liu. При этом средние абсолютные величины ошибок возрастают от 0,12 до 4,26 м при различных условиях рельефа. Стандартное отклонение варьируется от 0,44 до 2,60 м. Средняя квадратическая ошибка составила менее 5 м. Более грубые величины ошибок получены при использовании алгоритмов Jenson и Planchon. Однако при создании ЦМР равнинных территорий алгоритм Jenson характеризуется бóльшими показателями точности в сравнении с алгоритмом Planchon. Это объясняется особенностью алгоритма Jenson сохранять отдельные понижения без изменений высот. Однако СКО алгоритмов Jenson и Planchon для сильно расчленённых равнин близки и составили более 10 м.

Заключение. При создании цифровой модели рельефа важное значение имеет качество исходных данных, а также используемые алгоритмы заполнения локальных понижений. В связи с этим в предлагаемой работе проведена коррекция цифровых моделей рельефа ASTER GDEM2, SRTM X-band, ALOS DSM. Сравнительный анализ точности показал, что скорректированная ЦМР, полученная по снимкам ALOS DSM, характеризуется более низкими значениями средней квадратической ошибки.

Выполненный анализ известных алгоритмов Jenson, Planchon, PFA и ANUDEM продемонстрировал, что меньшими значениями точности (минимальными, средними, максимальными абсолютными ошибками, стандартным отклонением, средней квадратической ошибкой) отличается алгоритм ANUDEM. Это объясняется использованием в процессе цифрового моделирования топографических карт масштаба 1 : 50000 (на которых отражены горизонталы, высоты точек земной и водной поверхностей) и получением ЦМР, описывающей поверхность, совпадающей с топографической.

Результаты оценки точности, полученные с помощью алгоритмов заполнения локальных понижений PFA, Jenson, Planchon, характеризуются бóльшими значениями в сравнении с алгоритмом ANUDEM, что объясняется применением в процессе моделирования космических снимков и формированием на их основе модели поверхности без учёта высот древесной и иной растительности. Возможно дальнейшее улучшение свойств снимков ALOS DSM за счёт создания специальной маски.

Алгоритм PFA в сравнении с алгоритмами Jenson, Planchon обладает более высокой вычислительной способностью и более низкими значениями точности. Полученные величины СКО для различных условий рельефа не превышают 5 м. В данной работе скорректирована цифровая модель рельефа Новосибирской области с высоким пространственным разрешением (30 м) на основе космических снимков ALOS DSM с применением алгоритма L. Wang и H. Liu. Это позволило осуществить геоморфометрический и гидрологический анализы рельефа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шарый П. А.** Геоморфометрия в науках о Земле и экологии: обзор методов и приложений // Изв. СамНЦ РАН. 2006. 8, № 2. С. 458–473.
2. **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications** /Eds. T. Hengl, H. I. Reuter. Ser.: Developments in Soil Science. USA: Elsevier, 2009. Vol. 33. Ch. 1: Geomorphometry: A brief guide /R. J. Pike, I. S. Evans, T. Hengl. 2008. P. 3–30.
3. **Studies on Environmental and Applied Geomorphology** /Eds. T. Piacentini, E. Miccadei. Croatia: InTech, 2012. 294 p. Ch. 3: Geomorphological instability triggered by heavy rainfall: Examples in the Abruzzi region (Central Italy) /E. Miccadei, T. Piacentini, F. Daverio, R. Di Michele. P. 45–63.
4. **Алексеев А. С., Никифоров А. А.** Влияние рельефа на структуру и продуктивность лесных ландшафтов с применением 3D-моделирования на примере Лисинского учебно-опытного лесхоза // Лесоведение. 2014. № 5. С. 42–53.
5. **Шарая Л. С., Шарый П. А.** Изучение пространственной организации лесных экосистем с помощью методов геоморфометрии // Экология. 2011. № 1. С. 3–10.
6. **Павлова А. И., Каличкин В. К.** Использование геоморфометрического анализа рельефа при создании базы данных сельскохозяйственных земель // Сиб. вестн. сельскохоз. науки. 2016. № 5. С. 5–13.
7. **Вики-Фотограмметрия.** Глобальные цифровые модели высот. URL: <http://www.racurs.ru/wiki> (дата обращения: 22.02.2017).
8. **Самсонов Т. Е.** Мультимасштабное картографирование рельефа: общегеографические и гипсометрические карты. Saarbrucken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 208 с.
9. **Gesch D., Evans G., Mauck J. et al.** The national map elevation // U. S. Geological Survey Open-File Report 2009-3053. 2009. 4 p. URL: <https://pubs.usgs.gov/fs/2009/3053/> (дата обращения: 22.03.2018).
10. **Gesch D. B., Oimoen M. J., Evans G. A.** Accuracy assessment of the U. S. Geological Survey National Elevation Dataset, and comparison with other large-area elevation datasets SRTM and ASTER // U. S. Geological Survey Open-File Report 2014-1008. 2014. 10 p. URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2014/1008/pdf/ofr2014-1008.pdf> (дата обращения: 22.03.2018).
11. **Дубинин М.** Общее описание ASTER GDEM // GIS-LAB. Географические информационные системы и дистанционное зондирование. 2009. URL: <http://gis-lab.info/qa/aster-gdem.html> (дата обращения: 6.01.2017).
12. **Shuttle radar topography mission.** Data products. URL: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/cband-dataproducts.html> (дата обращения: 1.08.2017).
13. **Farr T., Rosen P., Caro E. et al.** The shuttle radar topography mission // Rev. Geophys. 2007. 45, N 2. P. 1–33.
14. **Rodriguez E., Morris C. S., Belz J. E.** A global assessment of the SRTM performance // Photogramm. Eng. and Remote Sens. 2006. 72, N 3. P. 249–260.

15. **Tadono T., Ishida H., Oda F. et al.** Precise global DEM generation by ALOS PRISM // ISPRS Ann. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inform. Sci. 2014. **II-4**. P. 71–76.
16. **Takaku J., Tadono T., Tsutsui K., Ichikawa M.** Validation of 'AW3D' global DSM generated from ALOS PRISM // ISPRS Ann. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inform. Sci. 2016. **III-4**. P. 25–31.
17. **Павлова А. И.** Анализ методов интерполирования высот точек для создания цифровых моделей рельефа // Автометрия. 2017. **53**, № 2. С. 86–94.
18. **Кравцов В. М., Донукалова Р. П.** География Новосибирской области: Учеб. пособие. Новосибирск: ИНФОЛИО-пресс, 1999. 208 с.
19. **Jenson S. K., Domingue J. O.** Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis // Photogramm. Eng. and Remote Sens. 1988. **54**, N 11. P. 1593–1600.
20. **Planchon O., Darboux F.** A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // Catena. 2001. **46**, Is. 3. P. 159–176.
21. **Wang L., Liu H.** An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // Intern. Journ. Geograph. Inform. Sci. 2006. **20**, Is. 2. P. 193–213.
22. **Hutchinson M. F.** A new method for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // Journ. Hydrology. 1989. **106**, N 3. P. 211–232.
23. **O'Callaghan J., Mark D.** The extraction of drainage networks from digital elevation data // Computer Vision, Graphics and Image Process. 1984. **28**, N 3. P. 323–344.
24. **Barnes R., Lehman C., Mulla D.** Priority-flood: An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models // Computers & Geosci. 2014. **62**. P. 117–127.
25. **Liu Y., Zhang W., Xu J.** Another fast and simple DEM depression filling algorithm based on priority queue structure // Atmospheric and Oceanic Sci. Lett. 2009. **2**, N 4. P. 214–219.
26. **Fairfield J., Leymarie P.** Drainage networks from grid digital elevation models // Water Resour. Res. 1991. **27**, N 5. P. 709–717.
27. **Lea N. L.** An aspect driven kinematic routing algorithm // Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics /Eds. A. J. Parsons, A. D. Abrahams. N. Y.: Chapman & Hall, 1992. P. 147–175.
28. **Tarboton D. G.** A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models // Water Resour. Res. 1997. **33**, N 2. P. 309–319.
29. **She M.** An Integrated Hydrological Modelling System: User Guide. DHI Software, 2007. Vol. 1. 396 p.

Поступила в редакцию 3 ноября 2017 г.