Научная статья УДК 528.9:004.021 (470.621) +004.9:528.9 (470.621) ББК 26.821:32.81 (2Рос.Ады) П 38 DOI: 10.53598 / 2410-3225-2021-4-291-125-134

Расчет основных геоморфологических параметров элементарных поверхностей рельефа на основе ЦРМ в цифровой платформе точного земледелия Адыгеи

(Реиензирована)

Ольга Анатольевна Плисенко¹, Татьяна Павловна Варшанина²

1, 2 Адыгейский государственный университет, Адыгейский научно-исследовательский институт сельского хозяйства РАСН, Майкоп, Россия ¹ plisenko_olji@fromru.com

gic-info@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы разработки алгоритмического обеспечения цифровой поддержки экологически сбалансированного точного земледелия в Республике Адыгея. Представлено описание основных техник расчета геоморфологических параметров и инсоляции виртуальной модели поля. Разработаны алгоритмы расчета уклона, экспозиции и инсоляции для элементарных поверхностей – структурных элементов модели.

Ключевые слова: геоинформационная система, виртуальная модель поля, элементарная поверхность, алгоритмы расчета уклона, экспозиции и инсоляции склонов, земли сельскохозяйственного назначения, точное земледелие

Original Research Paper

Digital relief model based calculation of basic geomorphological parameters of elementary relief surfaces in digital platform of Adyghea precision agriculture

Olga A. Plisenko¹, Tatyana P. Varshanina²

^{1, 2} Adyghe State University, Adyghe Research Institute of Agriculture of the Russian Academy of Agricultural Science, Maikop, Russia

¹ plisenko_olji@fromru.com ² gic-info@yandex.ru

Abstract. The paper deals with the development of algorithmic provision of digital support of ecologically balanced precision agriculture in the Republic of Adyghea. The publication describes basic techniques for calculating geomorphological parameters and insolation of a virtual field model. The authors develop the algorithms for calculating slope, exposure and insolation for elementary surfaces - structural elements of the model.

Keywords: geoinformation system, virtual field model, elementary surface, slope calculation algorithms, slope exposure and insolation, agricultural land, precision farming

Введение

Одним из приоритетных направлений фундаментальных и поисковых научных исследований на 2021-2030 годы, согласно Распоряжению Правительства РФ от 31.12.2020 N 3684-р «Об утверждении Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы)», является оптимизация сельскохозяйственного природопользования, агроэкологическая оценка земель, создание адаптивных систем земледелия и агротехнологий нового поколения на основе цифровизации и регулирования потоков биогенных элементов в агроэкосистемах. Применение современных цифровых технологий в рамках указанного направления позволяет сформировать оптимальные почвенно-агротехнические и организационнотерриториальные условия, обеспечивающие в течение всего жизненного цикла сельскохозяйственной продукции значительное повышение урожайности и производительности труда, снижение материальных затрат, сохранение плодородия почв и защиту окружающей среды [1].

В целях рационального экономически эффективного землепользования и воспроизводства почвенного плодородия разрабатывается геоинформационная система (ГИС) поддержки экологически сбалансированного адаптивно-ландшафтного и умного точного земледелия в Республике Адыгея [2, 3].Разрабатываемая ГИС предоставляет функции автоматизированной паспортизации сельскохозяйственных полигонов на основе адаптивно-ландшафтного мезорайонирования, автоматизированной классификации природно-экологических морфотипов поверхности рельефа, микроклиматической оценки и локализации репрезентативных точек агрохимического мониторинга. Основные положения методологии описаны в [4].

В рамках разрабатываемой ГИС создается пространственная виртуальная модель поля как объект анализа, мониторинга, оптимизации агротехнологий и прогнозирования урожайности. Виртуальная модель поля рассматривается в качестве сложной системы, образуемой различными факторами, действующими в рамках ограниченных 3D моделью рельефа структурных элементарных поверхностей, однородных с геоморфологической точки зрения.

Влияние рельефа поля на протекание природных процессов описывается базовыми геоморфологическими параметрами, такими как уклон, кривизна в профиле и плане, экспозиция относительно сторон света. С помощью этих параметров оцениваются потенциальный режим увлажнения почв, протекание эрозионных процессов, мощность почвенного профиля, количество солнечной энергии, приходящей на поверхность и т.д.

Перечисленные геоморфологические параметры позволяют охарактеризовать климатические особенности модели поля как результат влияния географической широты, высоты над уровнем моря, сезонной изменчивости прозрачности атмосферы, а также определить особенности растительного покрова, водный и температурный режим почв, механический состав корнесодержащего слоя и спрогнозировать пространственное распределение и режим внесения удобрений.

При создании цифровой виртуальной модели поля в разрабатываемой ГИС были проанализированы существующие геоинформационные методы расчета указанных параметров и разработаны соответствующие алгоритмы для элементарных поверхностей.

Основная часть

1. Алгоритмы расчета уклона и экспозиции

Оценка уклона и экспозиции с помощью цифровой модели рельефа (ЦМР) с регулярной сеткой является обычной процедурой при анализе местности, поэтому функции расчета уклона и экспозиции есть практически в любой геоинформационной системе, в том числе и в QGIS. Результатом работы этих функций является растр, каждой ячейке которого приписано значение экспозиции или уклона. Для анализа геоморфологических параметров поля это неудобно, так как не позволяет получить общую экспозицию/уклон для отдельных элементарных поверхностей и распределение этих величин для полей, входящих в иерархию единиц природно-хозяйственного районирования, отражающих конкретные типы природопользования, определяемых ресурсным потенциалом и условиями его освоения. Иерархия единиц природно-хозяйственного районирования включает природно-хозяйственные подрайон, район и мезорайон. В свою очередь, составляющими природно-хозяйственного подрайона являются поля, состоящие из элементарных поверхностей.

Таким образом, в рамках создания геоинформационной системы поддержки экологически сбалансированного адаптивно-ландшафтного и умного точного земледелия в Республике Адыгея [3, 4] разрабатываются оригинальные алгоритмы расчета и перерасчета экспозиции и уклона для основных пространственных единиц анализа (элементарная поверхность, поле, природно-хозяйственные подрайон, район, мезорайон).

Обобщенный алгоритм перерасчета крутизны и экспозиции для природнохозяйственного района представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Алгоритм перерасчета крутизны и экспозиции для природно-хозяйственного района с учетом характеристик элементарных поверхностей

Fig. 1. Algorithm for recalculating slope and exposure for natural economy area taking into account elementary surfaces characteristics

На первом шаге работы алгоритма определяется множество элементарных поверхностей, входящих в район. Для каждой элементарной поверхности из цифровой модели рельефа вырезается фрагмент, соответствующий этой поверхности. Все расчеты производятся относительно него. Далее для каждой элементарной поверхности рассчитывается уклон и экспозиция следующим образом. Сначала определяются значения уклона и экспозиции для каждой ячейки растра, затем определяются наиболее часто встречающиеся значения среди ячеек растра, и они становятся обобщенными значениями для элементарной поверхности. Это позволяет не учитывать локальные максимумы и минимумы вычисляемых величин. Кроме того, в соответствии с концепцией элементарной поверхности, описанной в [5], элементарная поверхность с геометрической точки зрения не может содержать вертикальные и горизонтальные перегибы, влияющие на значение этих величин кардинально.

Для вычисления уклона / экспозиции в каждой ячейке растра вызывается отдельный алгоритм.

Расчет экспозиции основан на расчете уклона – максимальной скорости изменения значений высоты от каждой ячейки до соседних. Значения всех ячеек выходного растра указывают направление по компасу, с которым сталкивается поверхность в этом местоположении. Оно измеряется по часовой стрелке в градусах от 0 (север) до 360 (снова север), проходя полный круг. Плоским областям, не имеющим направления вниз по склону, дается значение –1.

Поэтому рассмотрим сначала алгоритм расчет уклона ячейки как базовый, а затем на основе него – алгоритм расчета экспозиции этой же ячейки.

Существует восемь таких алгоритмов. Их обзор и анализ устойчивости относительно типа рельефа приводится в [6]. Различие между алгоритмами состоит в методе вычисления перпендикулярных градиентов fx и fy. На основании выводов, сделанных авторами работы [6], для реализации в разрабатываемой ГИС был выбран наиболее устойчивый к типу рельефа алгоритм, основанный на аппроксимации дифференциальных операторов конечными разностями третьего порядка [7], взвешенных на величину, обратную квадрату расстояния (Third-order Finite Difference Weighted by Reciprocal of Squared Distance (3FDWRSD)) [8].

Общую схему алгоритма можно описать следующим образом.

В каждой точке ЦМР уклон может быть определен как функция градиентов в направлении *x* и *y*:

$$slope = \arctan\left(\sqrt{(fx)^2 + (fy)^2}\right).$$
 (1)

Общий подход при оценке fx и fy заключается в использовании скользящего окна 3×3 для получения конечной дифференциальной или локальной полиномиальной поверхности, подходящей для расчета ([9, 10]). Скользящее окно размером 3×3 ячейки проходит через каждую ячейку на входном растре и для каждой ячейки, расположенной в центре окна, с применением алгоритма, учитывающего значения восьми соседних ячеек, вычисляется значение уклона.

Определим окно 3×3 (рис. 2), и пусть размер ячейки (пространственное разрешение) равен *g*. Ячейка 5 представляет ячейку, для которой вычисляется значение уклона.

В следующих математических уравнениях вычисления уклона *zi* (*i*=1,2,...,9) – это значение высоты в ячейке *i* (определено на рис. 2).

9	8	7
6	5	4
3	2	1

Рис. 2. Скользящее окно размером 3x3 с пронумерованными ячейками Fig. 2. A 3x3 sliding window with numbered cells

Согласно методу 3FDWRSD перпендикулярные градиенты *fx* и *fy* вычисляются по следующим формулам:

$$fx = \frac{z^3 - z^1 + 2(z^6 - z^4) + z^9 - z^7}{8g},$$
(2)

$$fx = \frac{z^7 - z^1 + 2(z^8 - z^2) + z^9 - z^3}{8g}.$$
 (3)

Далее для расчета уклона в центральной ячейке найденные значения fx и fy подставляются в формулу (1).

Для расчета экспозиции с учетом степени изменений по обоим направлениям, x и y, для ячейки z_5 , значение вычисляется с использованием следующего уравнения (4):

$$aspect = 57,29578 \cdot \arctan\left(-\frac{fy}{fx}\right). \tag{4}$$

Значение экспозиции затем конвертируется в значения направлений по компасу (0–360 градусов) в соответствии со следующим правилом, представленным на рисунке 3. На рисунке переменная cell означает ячейку, для которой рассчитывается экспозиция.



Puc. 3. Перевод значения экспозиции в градусы Fig. 3. Converting an exposure value into degrees

2. Алгоритм расчета солнечной радиации

2.1. Основные положения

Под суммарной солнечной радиацией принято рассматривать количество тепла и света, приходящееся на единицу поверхности рельефа земной поверхности.

Солнечное излучение, попадающее в верхнюю часть атмосферы Земли, считается относительно постоянным с принятым значением 1367 Вт/м² [11]. Однако излучение, достигающее поверхности Земли, варьируется в зависимости от пространственных и временных факторов. Существует три группы факторов, определяющих взаимодействие солнечной радиации с поверхностью атмосферы Земли [12].

Географическое положение поверхности, а также положение Солнца.

Рельеф местности (высота, уклон и экспозиция поверхности, эффекты затенения).

Атмосферные эффекты (рассеяние, поглощение), такие как наличие газов, твердых и жидких частиц (аэрозоли, включая неконденсированную воду) и облаков.

Первая группа определяет доступное внеземное излучение и может быть точно рассчитана. Вторая группа учитывает влияние рельефа и также может быть смоделирована с высокой точностью с использованием цифровой модели рельефа. Для третьей группы высота над уровнем моря определяет ослабление солнечной радиации из-за толщины атмосферы. Ослабление, вызванное частицами газа, определяется относительной оптической массой и оптической толщиной, которые могут быть рассчитаны также достаточно точно. Для описания влияния твердых и жидких частиц может быть использован коэффициент мутности Линке, но из-за динамической природы этого коэффициента он не может быть смоделирован с высокой степенью точности. Наконец, эффект облаков, которые являются наибольшими ослабителями, очень трудно смоделировать.

Для целей сельскохозяйственного мониторинга расчеты суммарной солнечной радиации включают прямую и рассеянную составляющие.

Существует несколько подходов получения значений суммарной солнечной радиации: 1) на основе измерений на актинометрической станции и их интерполяции на территорию; 2) на основе уже смоделированных значений, например, в Европейском атласе солнечной радиации (ESRA); 3) с использованием геоинформационных моделей, учитывающих уклон и экспозицию склонов.

Рассматривая первый метод, отметим, что измеренные на актинометрической станции величины характеризуют инсоляцию территории в целом и не дают представления об имеющей место ее внутренней дифференциации.

Значения интенсивности излучения также могут быть получены непосредственно с метеорологических геостационарных спутников в виде данных сканирования с помощью радиометров, представленных растровыми картами различной периодичности (среднесуточные, среднемесячные и т.п.). Но спутниковые данные дают менее точные значения по сравнению с наземными измерениями, особенно в условиях пасмурного неба. В отличие от высокой стоимости строительства и обслуживания станций мониторинга инсоляции и относительно грубого пространственно-временного разрешения спутниковых оценок пространственно-ориентированные модели солнечной радиации обеспечивают экономичный способ характеристики пространственной и временной изменчивости инсоляции.

Радиационный режим различных элементарных поверхностей в пределах поля определяется множеством факторов, в том числе влиянием рельефа местности, приводящим к неравномерности пространственного распределения освещенности и, следовательно, приходящей радиации.

Таким образом, инсоляция, рассчитанная для каждой элементарной поверхности на основе модели рельефа, показывает внутреннюю дифференциацию территории, отражая сравнительные условия активности склоновых процессов, произрастания сельскохозийственных культур, ресурсного потенциала единиц ландшафтного районирования.

Реальные суммы радиации, достигающие каждой элементарной поверхности, будут определяться его пространственной ориентацией относительно Солнца, и в зависимости от нее могут в той или иной степени отличаться от сумм, измеренных на ближайшей актинометрической станции.

2.2 Обзор геоинформационных моделей расчета солнечной радиации

Геоинформационные модели (модели, использующие три основные составляющие группы данных: местоположение на поверхности земли, время, тематические значения) расчета солнечной радиации обеспечивают экономически эффективные средства для понимания пространственных и временных изменений значений приходящей солнечной радиации в зависимости от рельефа в масштабах отдельно взятого поля. Широко известные ГИС, такие как ArcGIS, IDRISI или GRASS, предоставляют свои инструменты для расчета радиационного режима. Алгоритмы, используемые в этих инструментах, учитывают отбрасываемые тени и отраженную солнечную энергию, что позволяет соотносить оценки солнечной радиации с другими параметрами, например, такими, как почвенный покров.

Рассмотрим особенности двух основных инструментов, используемых в широко распространенных ГИС (ArcGIS, GRASS). При реализации их алгоритмов используются два различных подхода к оценке ежедневного солнечного излучения. Оба эти инструмента реализуют геометрический подход, который разделяет небо на различные сектора, определяемые их координатами зенита и азимута.

Solar Radiation toolset

Solar Radiation toolset представляет собой пакет инструментов, входящих в модуль Spatial Analyst ГИС ArcGIS 10. Пакет позволяет как построить карту приходящей солнечной радиации на целую область, так и определить значения в отдельно взятой точке. Инструменты пакета основаны на алгоритме полусферической видимости, разработанном Полом Ричем и Пинде Фу в 2000 году. Уравнения расчета солнечного излучения изложены в работе [12].

Согласно этому алгоритму суммарная радиация (в работах она рассматривается как глобальная) вычисляется как сумма прямого и рассеянного излучения для каждой ячейки растра цифровой модели рельефа (DEM), что приводит к построению карт инсоляции для всей заданной географической области.

Для расчета прямого излучения используется следующая простая модель. В качестве первого шага создается полусферический вид сверху (виртуальная фотография «рыбьего глаза») для каждого пикселя ЦМР, который показывает все небо полностью, аналогично виду в планетарии. На основе полусферического вида сверху вычисляется карта видимости (растровое представление всего неба, видимого или затененного в каждой точке наблюдения). Каждой ячейке растра видимости присваивается значение, которое соответствует тому, видимо ли направление или нет.

Количество прямого солнечного излучения, исходящего из каждого сектора неба, представлено путем создания карты солнца в той же полусферической проекции, что и карта видимости. Карта солнца – это растровое представление, которое отображает траекторию движения солнца или видимое положение солнца в зависимости от времени суток и номера календарного дня по отдельным секторам неба. Общее прямое излучение – это сумма прямого излучения от всех секторов карты солнца, не загораживаемых (или частично не загораживаемых) обзорным экраном.

В отличие от прямого излучения, рассеянное солнечное излучение может исходить из любого направления неба и является результатом рассеяния по компонентам атмосферы (облака, частицы и т.д.). В алгоритме все небо подразделяется на ряд секторов, определяемых координатами зенита и азимута. Каждому сектору присваивается значение уникального идентификатора, наряду с углами зенита, центроида и азимута. Рассеянное излучение вычисляется для каждого сектора воздушного пространства на основе направления (зенит и азимут). Это растровая карта, известная как карта неба. Общая рассеянная инсоляция – это сумма рассеянной инсоляции от всех секторов карты неба, не загораживаемых (или частично не загораживаемых) обзорным экраном.

r.sun

Модуль r.sun, реализованный в ГИС GRASS, представляет собой модель расчета солнечной радиации с учетом поверхности рельефа, использовавшуюся при создании Европейского атласа солнечной радиации (ESRA). Алгоритм впервые опубликован в работе Ярослава Хоферки [13], и затем переработанная версия представлена в [12]. Там же можно найти основные расчетные формулы.

Модуль работает в двух режимах. Первый режим вычисляет угол падения солнечных лучей и солнечную освещенность (Bt/m^2) в определенное время суток, в то время как во втором режиме вычисляется время инсоляции и солнечное излучение (Bt/m^2 – день) для определенного дня года для условий ясного неба.

В обоих режимах рассчитывается суммарное солнечное излучение и его три компонента – прямое, рассеянное и отраженное от земли – в зависимости от времени, местоположения, а также рельефа и атмосферных условий. Входными данными для расчета является растровая модель рельефа и день года. Затенение отдельных участков вычисляется на основе модели рельефа или с помощью растровых карт горизонта, являющихся результатом вычисления модуля r.horizont. Могут быть заданы и другие параметры, такие как уклон, экспозиция, коэффициент мутности Линке и альбедо.

Выходные данные представляют собой растровые карты для прямого, рассеянного, отраженного и суммарного солнечного излучения, а также для угла падения солнечных лучей и продолжительности солнечного сияния.

При расчете прямого солнечного излучения в условиях ясного неба используется коэффициент ослабления, рассчитанный на основе относительной оптической массы воздуха и оптической толщины Рэлея. Влияние твердых и жидких частиц на прозрачность атмосферы описывается коэффициентом мутности Линке, который меняется в зависимости от географического положения, времени и высоты.

После расчета прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность значение проецируется на наклонную поверхность в зависимости от ее уклона и экспозиции (вычисляется на основе цифровой модели рельефа или задается вручную).

Рассеянное солнечное излучение на горизонтальную поверхность рассчитывается как произведение прямого внеземного солнечного излучения, функции пропускания (зависит только от коэффициента мутности Линке) и функции высоты солнца. Далее рассчитывается рассеянное солнечное излучение на наклонную поверхность с учетом освещенных солнцем, потенциально освещенных солнцем и затененных поверхностей по полученному значению на горизонтальную поверхность.

2.3. Алгоритм расчета приходящей солнечной радиации для элементарной поверхности

Для целей нашей работы выбран алгоритм r.sun, так как он, учитывая влияние рельефа на перераспределение солнечного излучения, может в качестве результата моделирования представлять как растры, так и отдельные значения для каждой элементарной поверхности. Данный алгоритм позволяет интегрировать пространственные и непространственные данные, обеспечивает возможность использования коэффициента затенения облаками и, наконец, представляет собой программное обеспечение с открытым кодом – доступен в Quantum GIS.

Обобщенный алгоритм вычисления приходящей солнечной радиации с использованием модуля r.sun представлен на рисунке 4.

Заключение

Таким образом, виртуальная морфологически описанная модель поверхности поля и разработанные для нее алгоритмы позволяют получить на основе информационно-математической модели каждой элементарной поверхности сравнительную оценку комплекса параметров, позволяющих далее моделировать перераспределение в рельефе биологически активных веществ и оптимальным образом построить уточненную пространственно-дифференцированную схему применения агротехнических средств.



Рис. 4. Расчет приходящей солнечной радиации для элементарной поверхности

Fig. 4. Calculation of incoming solar radiation for elementary surface

Примечания

1. Цифровая трансформация сельского хозяйства России: офиц. изд. Москва: Росинформагротех, 2019. 80 с.

2. Варшанина Т.П., Солодухин А.А., Коробков В.Н. ГИС построения и анализа геодинамической модели территорий // ИнтерКарто/ИнтерГИС-18: устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт: материалы междунар. науч. конфер. Смоленск; Сен-Дье-де-Вож: Принт АП Смоленск, 2012. С. 17–23.

3. Варшанина Т.П., Пьянков В.Ю., Шехов З.А. ГИС экологически сбалансированного ландшафтно-адаптивного землепользования // Четвертые ландшафтно-экологические чтения, посвященные Г.Е. Гришанкову: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 82–87.

4. Варшанина Т.П., Бжецева А.Б., Плисенко О.А. Методология базовой цифровой платформы умного точного земледелия Республики Адыгея // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер.: Естественно-математические и технические науки. 2020. Вып. 1 (256). С. 43–53. URL: http://vestnik.adygnet.ru

5. Ласточкин А.Н. Системно-морфологическое основание наук о Земле (Геотопология, структурная география и общая теория геосистем). Санкт-Петербург: Изд-во НИИХ СПбГУ, 2002. 762 с.

6. Tang J., Pilesjö P., Persson A. Estimating slope from raster data – a test of eight algorithms at different resolutions in flat and steep terrain // Geodesy and Cartography. 2013. No. 39 (2). P. 41–52. URL: https://doi.org/10.3846/20296991.2013.806702

7. Емельянов В.Н. Численные методы: введение в теорию разностных схем: уч. пособ. для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Изд-во Юрайт, 2020. 188 с.

8. Horn B.K.P. Hill shading and the reflectance map // Proceedings of the IEEE. 1981. No. 69 (1). P. 14–47.

9. Florinsky I.V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models //

International Journal of Geographical Information Science. 1997. No. 12 (1). P. 47-62.

10. Zhou Q.M., Liu X.J. Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties // Computers & Geosciences. 2004. No. 30 (4). P. 369–378.

11. Макарова Е.А. Солнечная постоянная // Физика космоса / гл. ред. Р.А. Сюняев. 2-е изд. Москва: Советская энциклопедия, 1986. 627 с.

12. Hofierka J., Su'ri M. 2002. The solar radiation model for open source GIS: implementation and applications // In Proceedings of the Open Source GIS-GRASS Users Conference, September 2002, Trento, Italy. P. 1–19.

13. Hofierka J. 1997. Direct solar radiation modelling within an open GIS environment // In Proceedings of the Joint European GIS Conference, April 1997, Vienna, Austria. P. 575–584.

References

1. Digital transformation of agriculture in Russia: official ed. Moscow: Rosinformagrotekh, 2019. 80 p.

2. Varshanina T.P., Solodukhin A.A., Korobkov V.N. GIS for construction and analysis of the geodynamic model of territories // InterCarto/InterGIS-18: sustainable development of territories: GIS theory and practical experience: proceedings of the international scient. conf. Smolensk; Saint-Dieu-de-Vosges: Print AP Smolensk, 2012. P. 17–23.

3. Varshanina T.P., Pyankov V.Yu., Shekhov Z.A. GIS of environmentally balanced landscapeadaptive land management // Fourth landscape-ecological readings dedicated to G.E. Grishankov: coll. of proceedings of the international scient. and pract. conf. 2020. P. 82–87.

4. Varshanina T.P., Bzhetseva A.B., Plisenko O.A. Basic digital platform methodology for knowledge-based precision farming of the Adyghea Republic // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser.: Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2020. Iss. 1 (256). P. 43–53. URL: http://vestnik.adygnet.ru

5. Lastochkin A.N. System-morphological basis of the Earth sciences (Geotopology, structural geography and general theory of geosystems). St. Petersburg: Publishing House of NIIKh SPbSU, 2002. 762 p.

6. Tang J., Pilesjö P., Persson A. Estimating slope from raster data – a test of eight algorithms at different resolutions in flat and steep terrain // Geodesy and Cartography. 2013. No. 39 (2). P. 41–52. URL: https://doi.org/10.3846/20296991.2013.806702

7. Emelyanov V.N. Numerical Methods: Introduction to the theory of difference schemes: a manual for higher schools. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Urait Publishing house, 2020. 188 p.

8. Horn B.K.P. Hill shading and the reflectance map // Proceedings of the IEEE. 1981. No. 69 (1). P. 14–47.

9. Florinsky I.V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models // International Journal of Geographical Information Science. 1997. No. 12 (1). P. 47–62.

10. Zhou Q.M., Liu X.J. Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties // Computers & Geosciences. 2004. No. 30 (4). P. 369–378.

11. Makarova E.A. The Solar constant // Physics of space / ch. ed. by R.A. Syunyaev. 2nd ed. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1986. 627 p.

12. Hofierka J., Su'ri M. 2002. The solar radiation model for open source GIS: implementation and applications // In Proceedings of the Open Source GIS-GRASS Users Conference, September 2002, Trento, Italy. P. 1–19.

13. Hofierka J. 1997. Direct solar radiation modelling within an open GIS environment // In Proceedings of the Joint European GIS Conference, April 1997, Vienna, Austria. P. 575–584.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.11.2021; одобрена после рецензирования 11.12.2021; принята к публикации 12.12.2021.

The article was submitted 10.11.2021; approved after reviewing 11.12.2021; accepted for publication 12.12.2021.

© О.А. Плисенко, Т.П. Варшанина, 2021