

Алгоритм моделирования фотосинтетически активной радиации Солнца на основе цифровой модели рельефа ASTER GDEM v2 (на примере Архангельской области)

А. Л. Минеев¹, Е. В. Полякова^{1,2}, Ю. Г. Кутинов¹,
З. Б. Чистова¹, И. Н. Болотова¹

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, 163020, Россия
E-mail: mineew.al@gmail.com

² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

Анализируется энергия солнечного излучения, достигающая поверхности Земли. Показано, что она определяется тремя группами факторов: геометрией Земли и её вращением вокруг Солнца; атмосферным поглощением; рельефом местности. Рассмотрено, как влияют эти группы факторов на перераспределение потока солнечного излучения на глобальном, региональном и локальном уровне. Установлено, что на региональном и, особенно, локальном уровне именно рельеф выступает основным фактором, влияющим на перераспределение солнечной энергии. Также проведено моделирование трёх составляющих коротковолнового излучения Солнца — прямого, рассеянного и отражённого, модифицированных под влиянием рельефа местности. Полученные расчёты применены при моделировании фотосинтетически активной радиации (ФАР), как части солнечной радиации в диапазоне от 400 до 700 нм, используемой растениями для фотосинтеза. В результате сформирован поэтапный алгоритм построения ФАР на основе цифровой модели рельефа ASTER GDEM v2, адаптированной для Архангельской области, в геоинформационной системе SAGA GIS. Показано, что при переходе от глобального (планетарного) уровня через региональный (Архангельская область) к локальному (Беломорско-Кулойское плато) особенности рельефа территории вносят корректировки в широтную тенденцию распределения ФАР.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, ЦМР, коротковолновое солнечное излучение, фотосинтетически активная радиация, ФАР, Архангельская область

Одобрена к печати: 30.09.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-66-78

Введение

Неоднородность распределения поступающей солнечной энергии в пространстве и времени определяет динамику формирования многих природных процессов на поверхности Земли и в атмосфере, таких как температурный режим, уровень влажности воздуха и почвенного слоя, таяние снежного покрова, интенсивность фотосинтеза растений, объём суммарного испарения. Понимание пространственно-временных особенностей распределения солнечной радиации позволяет принимать обоснованные решения при рациональном использовании природных ресурсов, в сельскохозяйственном производстве, при архитектурном проектировании, землеустройительном планировании, проведении экологического мониторинга, в климатических исследованиях и т. п.

В условиях меняющегося климата территорий и неуклонного роста масштабов вырубки лесов возросшую актуальность приобретает исследование пространственно-временных характеристик распределения солнечной радиации. Из всего спектра излучения в жизнедеятельности растений наиболее важную роль играет видимое излучение с длиной волны в диапазоне 0,38–0,71 мкм. Фотосинтетически активная радиация (ФАР, англ. photosynthetically active radiation) — это часть доходящего до биоценозов солнечного излучения в видимом диапазоне, используемая растениями для фотосинтеза (Тооминг, Гуляев, 1967). По сравнению с традиционными наземными измерениями применение спутниковых данных позволяет

изучить режим распределения солнечной энергии и ФАР в охвате больших территорий и в динамике.

Значительный вклад в развитие алгоритмов моделирования солнечной энергии с учётом топографии внесли работы, основанные на использовании цифровых моделей рельефа (ЦМР). Классические и широко цитируемые подходы, такие как модели, предложенные в публикациях (Hofierka, Šúri, 2002; Kumar et al., 1997), а также их дальнейшее развитие в работах (Böhner, Antonić, 2009; Pons, Ninyerola, 2008; Zakšek et al., 2005), заложили основу для параметризации потоков солнечной радиации в сложном рельефе. Эти алгоритмы комплексно учитывают такие ключевые топографические параметры, как угол падения солнечных лучей, экспозиция склона, а также эффекты затенения и отражения от окружающего рельефа.

Анализ областей апробации данных исследований показывает, что они были успешно применены для территорий со значительным разнообразием рельефа, включая холмистые местности Австралии (Kumar et al., 1997), предгорные и горные регионы Центральной и Восточной Европы, такие как Словакия, Словения и Каталония (Hofierka, Šúri, 2002; Pons, Ninyerola, 2008; Zakšek et al., 2005), а также равнинные территории Венгрии (Böhner, Antonić, 2009). Однако, несмотря на широкий географический охват, систематический анализ сравнительной эффективности этих алгоритмов именно для условий обширных бореальных равнин, характеризующихся специфическим полого-холмистым рельефом малой расчленённости и особым радиационным режимом, проведён не был.

Таким образом, возникает определённый пробел не в наличии методов, а в их сравнительной верификации и выработке рекомендаций по оптимальному применению для конкретного типа ландшафтов. Для обширных равнин Архангельской области, где перепады высот не столь велики, как в более южных регионах, критически важным становится вопрос выбора наиболее адекватного и устойчивого алгоритма из числа существующих. Использование для этой цели современных глобальных ЦМР повышенного разрешения, таких как ASTER GDEM v2, позволяет детально оценить влияние слабо выраженных форм рельефа на пространственное распределение ФАР.

Цель настоящего исследования — выработка рекомендаций по применению алгоритмов моделирования солнечной энергии и ФАР для обширных бореальных равнин на примере Архангельской области при использовании данных ASTER GDEM v2 в программном обеспечении SAGA GIS.

Энергия солнечного излучения

Энергия солнечного излучения, достигающая поверхности Земли, проходит сложный путь трансформации в атмосфере и определяется тремя группами факторов (Hofierka, Šúri, 2002): геометрией Земли и её вращением вокруг Солнца; атмосферным поглощением; рельефом местности. Рассмотрим, как влияют эти факторы на глобальном, региональном и локальном уровне.

На глобальном уровне разница в плотности потока солнечного излучения между широтами обусловлена геометрией Земли и её вращением вокруг Солнца (первая группа факторов). Ключевым фактором является угол падения солнечных лучей. Скользящие по поверхности лучи на полюсах и практически перпендикулярно падающие на экваторе доставляют разное количество солнечной энергии на единицу площади. Орбитальное движение Земли формирует сезонные изменения интенсивности солнечной радиации. Использование астрономических формул позволяет точно определить влияние факторов первой группы, учитывая географическую широту, время года, суток и положение Солнца над горизонтом. Эти астрономические расчёты предоставляют так называемое доступное космическое излучение, которое подвергается влиянию следующих двух групп факторов — поглощение в атмосфере и рельеф.

Интенсивность космического солнечного излучения, проходящего через атмосферу Земли, ослабляется различными её составляющими, а именно газами, жидкими и твёрдыми

частицами и облаками. Поглощение, обусловленное газовыми составляющими, характеризуется рэлеевской идеальной моделью чистой и сухой атмосферы и определяется оптической массой и толщиной воздуха (Bodhaine et al., 1999; Deirmendjian, Sekera, 1954). Поглощение, обусловленное жидкими и твёрдыми частицами, характеризуется таким понятием, как мутность атмосферы, и количественно определяется с помощью коэффициентов мутности Линке, Ангстрема, Шуппа (Асадов и др., 2021; Louche et al., 1986). Значения коэффициента мутности подвержены сезонным колебаниям и в большой степени зависят от высоты местности над уровнем моря, степени индустриализации и урбанизации территории. Наиболее значимым фактором ослабления солнечной радиации в атмосфере являются облака. Для прогнозирования их влияния необходимо учитывать множество переменных, таких как толщина и количество слоёв облаков, их оптические свойства и расположение относительно друг друга. Высокая изменчивость свойств, типов и форм облачности затрудняет определение функциональной связи между характеристиками облаков и наблюдаемыми энергетическими показателями (Русскова, Скороходов, 2024). Поэтому на практике чаще используются упрощённые эмпирические методы оценки облачности, такие как визуальные наблюдения, статистический анализ, приближённые расчёты. Учитывая влияние всех перечисленных факторов, их сложного взаимодействия и динамичную природу атмосферных процессов, поглощение излучения в атмосфере может быть смоделировано только с определённым уровнем точности.

Космическое излучение, поступающее на поверхность Земли, изменяется под воздействием рельефа местности. Отличия в значениях основных геоморфометрических параметров — высоты, угла наклона, экспозиции и кривизны склонов, — а также тень, отбрасываемая элементами рельефа, создают сильные локальные перепады. Благодаря широкому распространению и доступности данных дистанционного зондирования Земли и их производных, а именно цифровых моделей рельефа, влияние мезо- и микрорельефа на перераспределение потока солнечной энергии может быть смоделировано с высокой степенью точности.

Для многих практических применений базовым показателем является солнечное излучение при ясном небе, т.е. при отсутствии атмосферного поглощения. Такое условие определяет максимальную плотность потока солнечного излучения, которую может получить местность, исходя из географического положения и характеристик рельефа. Данный показатель необходим при планировании мероприятий во многих сферах человеческой деятельности: например, при планировании размещения систем солнечной энергетики (солнечные электростанции); при расчёте нагрузок на системы отопления и охлаждения зданий, при планировании ориентации зданий для оптимальной инсоляции помещений; при прогнозировании роста и развития сельскохозяйственных культур.

Таким образом, учитывая глобальный характер влияния геометрии Земли, а также сложность и высокую степень обобщения при прогнозировании атмосферного поглощения, в исследованиях на региональном и, особенно, локальном уровне именно рельеф выступает основным фактором, влияющим на перераспределение солнечного излучения (Mei et al., 2015).

Моделирование энергии солнечного излучения с помощью цифровой модели рельефа

Принято выделять два основных типа солнечного излучения по длине волн: коротковолновое и длинноволновое излучение. Взаимодействуя между собой, эти два типа излучения поддерживают тепловое равновесие Земли, в котором поступающее от Солнца коротковолновое излучение нагревает атмосферу и поверхность Земли и возвращается обратно в космос в виде длинноволновой радиации, охлаждая атмосферу и поверхность. При этом на коротковолновое излучение приходится практически вся солнечная энергия.

Коротковолновое излучение Солнца включает в себя три составляющие — прямое, рассеянное и отражённое. Прямое солнечное излучение полностью достигает поверхности Земли. Рассеянное — распределяется в атмосфере под воздействием газов, жидких и твёрдых частиц. Отражённое — та часть излучения, которая отражается от соседних элементов рельефа.

В моделировании солнечного излучения средствами ЦМР могут рассматриваться две величины: 1) плотность потока солнечного излучения (энергетическая освещённость, облучённость), которая показывает, сколько энергии поступает на единицу площади в данный момент времени, и измеряется в Вт/м²; 2) количество энергии, переданной за определённый промежуток времени на единицу площади, которое измеряется в Вт·ч·м⁻² или в Дж/м² (здесь следует отметить, что в большинстве самых распространённых ГИС (ArcGIS, QGIS, SAGA GIS) при моделировании солнечного излучения по умолчанию используются именно Вт·ч·м⁻²). Взаимосвязь между тремя составляющими коротковолнового излучения Солнца отображает плотность потока общего излучения, приходящегося на элемент рельефа, за исключением той доли, которую рельеф отражает на соседние элементы, и выражается следующей формулой (в Вт/м²):

$$\Phi_n = (\Phi_s + \Phi_h + \Phi_t) \cdot (1 - r),$$

где Φ_n — плотность потока общего коротковолнового излучения Солнца; Φ_s , Φ_h , Φ_t — плотность потока прямого, рассеянного и отражённого излучения соответственно; r — коэффициент отражения (альбедо) поверхности.

Для различных типов поверхностей существуют специальные таблицы значений альбедо.

Рельеф по-разному взаимодействует с прямым, рассеянным и отражённым излучением, и, соответственно, эти три составляющие необходимо моделировать отдельно. Моделирование происходит либо в выбранном моменте времени (в этом случае речь идёт о плотности потока солнечного излучения и единицах измерения Вт/м²), либо итеративно за определённый его интервал (тогда речь идёт о количестве накопленной энергии за этот интервал и единицах измерения Вт·ч·м⁻²). В случаях, когда моделирование необходимо провести за интервал времени (например, за месяц), в первую очередь выбирается окно в течение дня, которое используется для расчёта суточной суммы радиации (например, от 09:00 до 18:00). Затем выбирается шаг итерации (обычно, 30 мин или 1 ч). Далее на каждом шаге, т. е. в определённый момент времени, который определяет астрономические факторы (солнечное склонение, часовой угол, азимут и высота Солнца), в рамках дневного окна происходит моделирование мощности солнечного излучения. И, наконец, множество значений объединяется для представления количества энергии, накопленной за интервал времени.

Затем вносятся корректировки, связанные с эффектом затенения. Всего выделяют два типа теней: собственная и отброшенная тень (*рис. 1*, см. с. 70). Для каждой ячейки ЦМР рассчитывается угол наклона (угол в точке пересечения между горизонтальной плоскостью и плоскостью касательной к земной поверхности, β) и экспозиция склона (угол по часовой стрелке между определённым направлением и проекцией уклона на горизонтальную плоскость, α), чтобы получить угол γ между солнечными лучами и нормалью склона. Этот угол однозначно определяет, расположен ли склон к Солнцу или полностью находится в собственной тени. При $\cos\gamma > 0$ — склон полностью освещён, при $\cos\gamma \leq 0$ — склон полностью в собственной тени.

$$\cos\gamma = \cos\beta \cdot \sin\theta + \sin\beta \cdot \cos\theta \cdot \cos(\phi - \alpha), \quad (1)$$

где β — угол наклона склона; α — экспозиция склона; θ — угловая высота Солнца; ϕ — зд. азимут Солнца.

Для учёта эффекта отброшенной тени вокруг ячейки ЦМР в разных направлениях выполняется поиск соседних ячеек с большей высотой. По расстоянию до препятствия, высоте препятствия и высоте Солнца над горизонтом определяется угол наклона горизонта φ (*рис. 2*, см. с. 70), который указывает, находится ли рассматриваемая ячейка в отброшенной от препятствия тени. При значениях $\varphi > 0$ — склон расположен в отброшенной тени, при значениях $\varphi \leq 0$ — склон освещён.

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\Delta z}{d} \right)_{\max},$$

где φ — угол наклона горизонта; Δz — разница в высоте между склоном и препятствием; d — расстояние до препятствия.

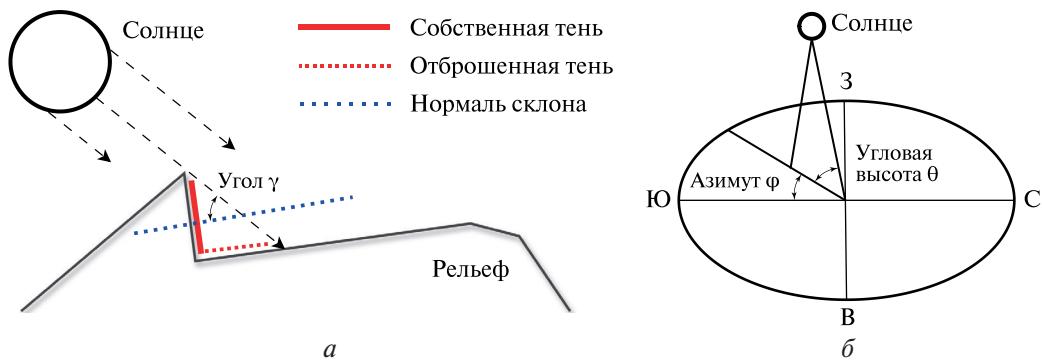


Рис. 1. Схематичное изображение эффекта затенения, согласно формуле (1):
а — угол между солнечными лучами и нормалью склона; б — угловая высота и азимут Солнца

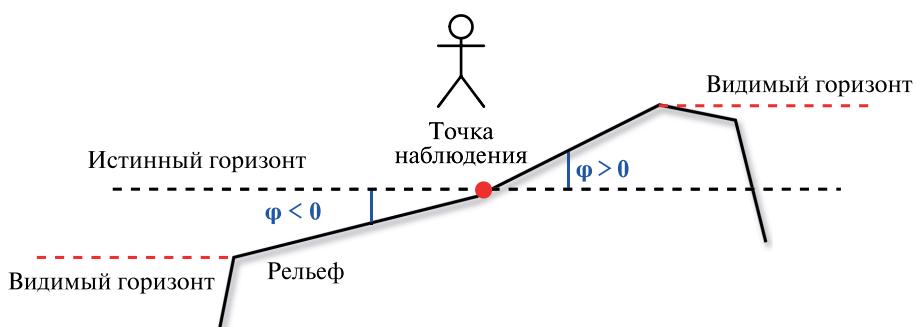


Рис. 2. Схематичное изображение угла наклона горизонта ϕ

Таким образом, прямое солнечное излучение, модифицированное под влиянием рельефа местности (Φ_s^*), рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi_s^* = \zeta \frac{\Phi_s}{\sin \theta} \cos \gamma,$$

где ζ — маска тени (может иметь значение 0 — склон находится в тени, либо 1 — склон освещён).

При анализе влияния рельефа на рассеянное солнечное излучение используется предположение об изотропии неба — равномерном распределении светового потока по всей небесной сфере. На основе этого допущения разработана методика оценки влияния рельефа через коэффициент видимости небосвода. Коэффициент видимости небосвода — безразмерная величина, которая служит для количественной оценки доли видимого небосвода с определённой точки местности. Этот показатель рассчитывается для каждой ячейки ЦМР и позволяет оценить, насколько ячейка ЦМР, которая представляет собой элемент рельефа (склон), скрыта от видимого полушария неба окружающими ячейками. Диапазон значений коэффициента чётко определён: 1 (единица) — полностью открытый склон с беспрепятственным обзором неба; 0 (ноль) — полностью закрытый склон, небо не просматривается. Таким образом, рассеянное солнечное излучение, модифицированное под влиянием рельефа местности (Φ_h^*), рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi_h^* = \Phi_h \psi_s,$$

где ψ_s — коэффициент видимости небосвода.

На излучение, получаемое элементом рельефа в результате отражения от соседних элементов, в первую очередь влияет та часть небесной полусферы, которая закрыта окружающими элементами рельефа. Следует отметить, что в общем потоке солнечного излучения доля отражённого потока напрямую зависит от альбедо поверхности и, как правило, относительно невелика по сравнению с прямым и рассеянным излучением за исключением слу-

чаев, когда альбедо приближается к единице (например, на сульфатных соляных покровах). В связи с этим для упрощения расчётов используется предположение об изотропии форм окружающего рельефа, хотя данное допущение часто не соответствует реальной ситуации. Вводится понятие коэффициента видимости рельефа, который при условии, что наблюдатель находится в ячейке ЦМР, определяет, просматриваются (полностью или частично) или не просматриваются окружающие её ячейки. Коэффициент видимости рельефа — безразмерная величина. Диапазон его значений чётко определён: 1 (единица) — ячейка расположена выше своего окружения, окружение полностью открыто для просмотра; 0 (ноль) — окружение ячейки полностью скрыто от просмотра (ячейка находится в низине). Для количественной оценки отражённого излучения применяется комплексный подход: рассчитывается коэффициент видимости рельефа, учитывается альбедо поверхности и оценивается суммарный объём прямого и рассеянного излучения. Итоговая величина отражённого излучения (Φ_t) определяется как произведение суммарных средних значений прямого и рассеянного излучения на коэффициенты видимости и отражения (альбедо):

$$\Phi_t \approx \psi_t (\Phi_{s(\text{avg})}^* + \Phi_{h(\text{avg})}^*) r_0,$$

где $\Phi_{s(\text{avg})}^*$ — среднее значение плотности потока прямого излучения; $\Phi_{h(\text{avg})}^*$ — среднее значение плотности потока рассеянного излучения; ψ_t — коэффициент видимости рельефа; r_0 — среднее значение альбедо.

Общий алгоритм моделирования трёх составляющих коротковолнового солнечного излучения представлен в виде блок-схемы на *рис. 3*.

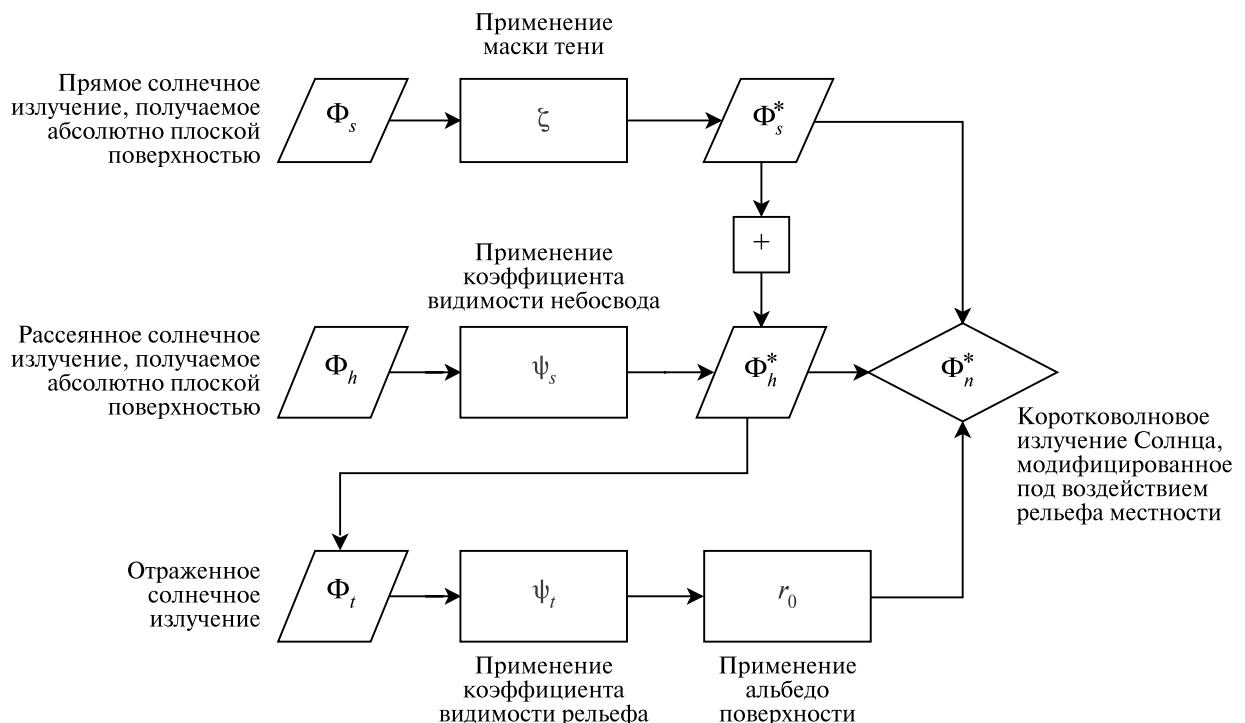


Рис. 3. Блок-схема алгоритма моделирования коротковолнового солнечного излучения

Применение алгоритма на территории Архангельской области

Говоря об эффекте затенения на обширных бореальных равнинах, каковой является Архангельская область, следует проверить гипотезу о том, что в условиях рельефа малой расчленённости эффект затенения пренебрежимо мал и не оказывает значимого влияния на итоговые значения солнечного излучения.

Чтобы количественно оценить вклад собственно рельефа в пространственное распределение солнечной энергии, был применён метод последовательного анализа влияния факторов. Его логика заключается в том, чтобы изолировать искажения, вносимые каждым фактором, путём сравнения с упрощённой моделью.

На первом этапе с помощью описанного алгоритма было рассчитано распределение количества солнечной энергии, полученного территорией Архангельской области в июле 2024 г., с использованием цифровой модели ASTER GDEM v2. Этот растр содержит суммарное влияние и широты, и всех топографических параметров (высоты, экспозиции, уклона, затенения).

На втором этапе по тому же алгоритму было проведено моделирование для искусственной, абсолютно плоской поверхности, расположенной в тех же границах и географических широтах. Данная модель служит эталоном, показывающим распределение солнечной энергии исключительно под влиянием широты. На плоской поверхности отсутствуют какие-либо формы рельефа, а значит, и их влияние.

Следующий шаг — операция разности между двумя рассчитанными растрами. Полученный растр разности представляет собой ту часть солнечной радиации, пространственное распределение которой обусловлено исключительно неоднородностью рельефа. Этот «очищенный» от широтного влияния сигнал и стал объектом дальнейшего анализа взаимосвязи с конкретными геоморфометрическими параметрами (*рис. 4*).

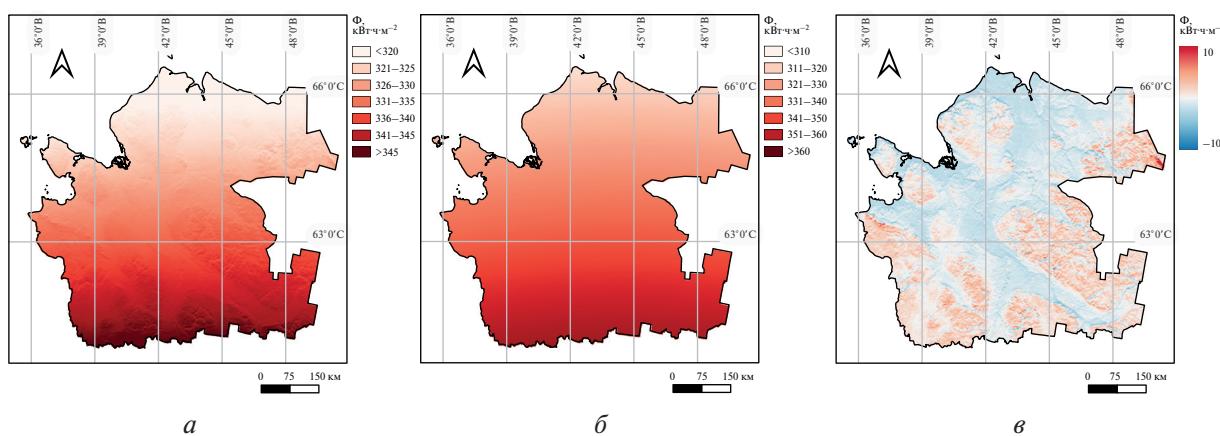


Рис. 4. Подготовка «очищенного» раstra: *а* — количество солнечной энергии, полученное территорией Архангельской области в июле 2024 г.; *б* — эталонная модель, показывающая распределение солнечной энергии исключительно под влиянием широты; *в* — очищенный от широтного влияния растр

Проведённый анализ показал, что вклад широтной зональности в пространственную дифференциацию солнечной энергии колеблется в пределах $300 \text{ кВт}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-2}$, в то время как вклад рельефа — в пределах $10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-2}$. Отсюда следует, что доминирующим фактором, конечно, является широтный градиент, превосходящий влияние рельефа на глобальном уровне примерно на порядок. Однако в то же время влияние рельефа отчётливо прослеживается на локальном уровне. Для того чтобы определить характер этого влияния, был проведён корреляционный анализ и построены диаграммы рассеяния между количеством солнечной энергии и геоморфометрическими параметрами рельефа: собственно, высотой, экспозицией склонов, индексом расчленённости рельефа и коэффициентом видимости небосвода (*рис. 5*, см. с. 73).

В пределах рельефной составляющей выявлены статистически значимые связи с абсолютной высотой (см. *рис. 5а*) и экспозицией склонов (см. *рис. 5б*). Корреляционный анализ не выявил значимой связи между распределением солнечной энергии и индексом расчленённости рельефа (см. *рис. 5в*), а также коэффициентом видимости небосвода (см. *рис. 5г*). Это свидетельствует о том, что полого-холмистый рельеф исследуемой территории влияет

на радиационный режим, в первую очередь через гипсометрический уровень и ориентацию поверхности, а сложное взаимное затенение расчленённых форм рельефа оказывает лишь незначительное влияние. Вероятно, на территориях, подобных исследуемой, возможно использование упрощённых моделей без ресурсоёмкого расчёта прямого затенения, и это не приведёт к существенной потере точности.

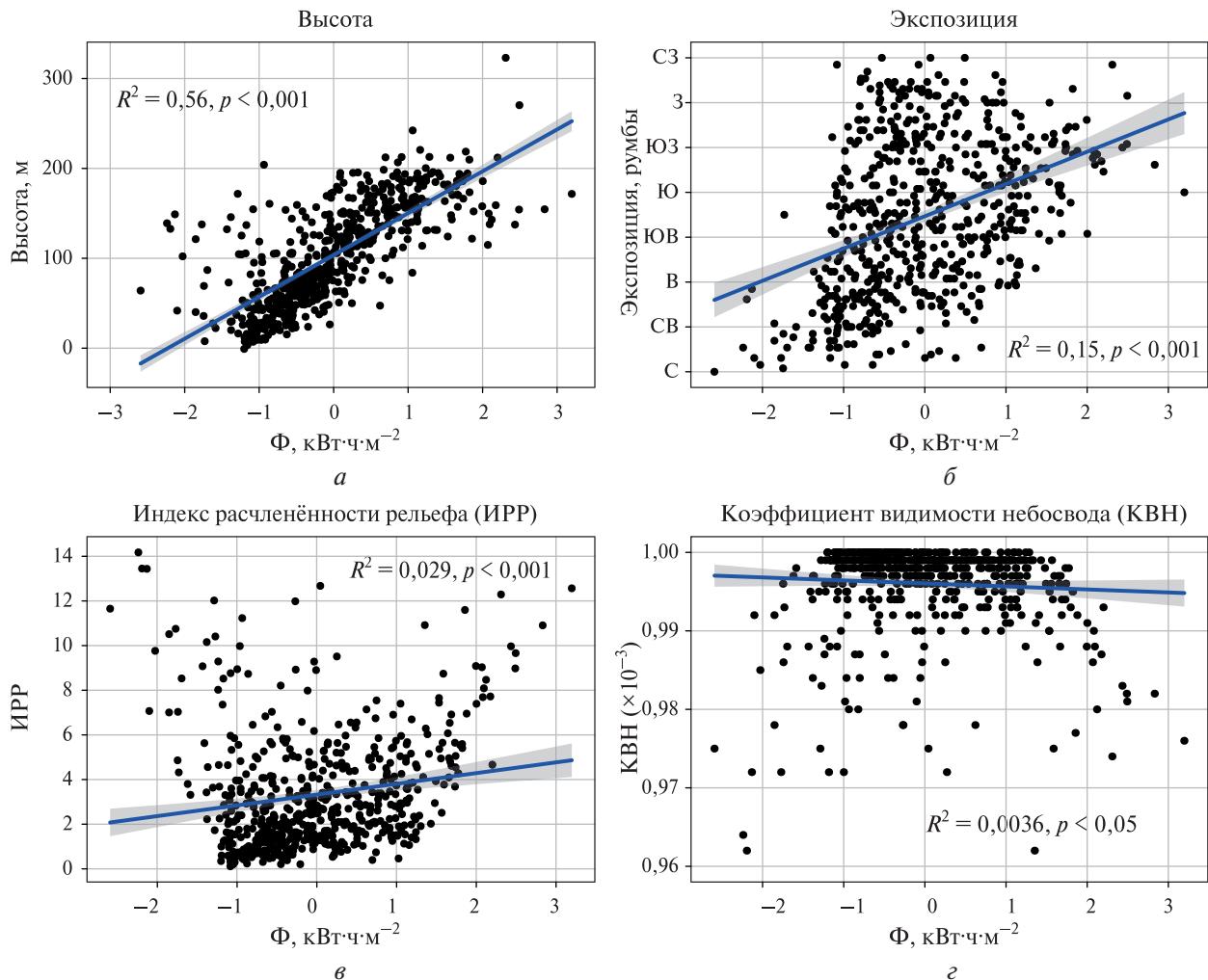


Рис. 5. Диаграммы рассеяния между количеством солнечной энергии и геоморфометрическими параметрами рельефа: *а* — высота; *б* — экспозиция; *в* — индекс расчленённости рельефа; *г* — коэффициент видимости небосвода. R^2 — коэффициент детерминации, p — уровень значимости

Моделирование ФАР с помощью ЦМР

Анализ изменчивости ФАР, определяющей первичную продуктивность естественного растительного покрова и агрофитоценозов, приобретает большое значение в климатических исследованиях в условиях изменения климата конкретных территорий (Матюшевская, 2015). Натурные измерения ФАР, как правило, сопровождены трудоёмким ручным процессом и ограничены количеством датчиков наземной аппаратуры, имеющейся у исследователя, поэтому выполняются довольно редко и только лишь в отдельных точках. Данные, полученные с наземных станций, не дают возможность оценить пространственную и временную изменчивость ФАР и исследовать влияние на неё различных факторов в динамике (Вазюля и др., 2015).

Учитывая недостатки наземного мониторинга ФАР, рядом авторов были разработаны и описаны методики расчёта значений ФАР с применением спутниковых данных (Frouin,

Pinker, 1995; Pinker, Laszlo, 1992; Viña, Gitelson, 2005) и методики моделирования ФАР с помощью эмпирических моделей (Alados et al., 1996; Nwokolo, Amadi, 2018). Использование спутниковых данных в измерениях ФАР основывается на вычислениях вегетационных индексов, таких как NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index), Red-edge NDVI или WDRVI (англ. Wide Dynamic Range Vegetation Index), с помощью которых оценивается доля поглощаемой биомассой ФАР. Либо спутниковые данные применяются в расчётах физических моделей атмосферы с различным уровнем учёта облачности, как в алгоритме NASA (англ. National Aeronautics and Space Administration) (Frouin et al., 2012) и алгоритме, разработанном в Институте океанологии РАН (Копелевич и др., 2003).

Эмпирические модели расчёта ФАР классифицируются по входным параметрам. Ряд моделей основаны на коэффициентах ясности и мутности атмосферы, на оптической массе воздуха, на характеристиках давления водяного пара и количестве облаков. Эти модели учитывают влияние загрязнений, аэрозолей, жидких и твёрдых частиц в атмосфере. Существуют температурные модели оценки ФАР, в которых используются данные о максимальной и минимальной температуре поверхности за период наблюдений. В последнее время разрабатываются и применяются гибридные модели и модели, основанные на искусственных нейронных сетях. Однако в силу простоты и доступности наиболее распространены модели, основанные на глобальной солнечной радиации, в которых используется прямая корреляция между энергией общего солнечного излучения и ФАР.

Одна из таких моделей описывается формулой Росса – Тооминга (Молдау и др., 1963) и определяет ФАР с помощью переходных коэффициентов от прямой и рассеянной солнечной радиации. Выражается в следующем виде:

$$\Phi_{\text{PAR}} = 0,4225\Phi_s + 0,582\Phi_h, \quad (2)$$

где Φ_{PAR} — ФАР.

Однако впоследствии было показано, что, оценивая суммарную ФАР, целесообразнее использовать формулу с одним коэффициентом (Мешик, Борушко, 2024; Шиловцева и др., 2005):

$$\Phi_{\text{PAR}} = 0,52\Phi_n. \quad (3)$$

Алгоритм моделирования коротковолнового солнечного излучения, описанный в предыдущем разделе, реализован в геоинформационной системе SAGA GIS в виде модуля Potential Incoming Solar Radiation. Модуль калькулятора растров Grid Calculator предоставляет возможность применять математические формулы к растровым данным. С помощью этих двух модулей на основе ЦМР ASTER GDEM v2, адаптированной для Архангельской области (Кутинов и др., 2019), было посчитано распределение ФАР за июль 2024 г. в пределах её материковой части (рис. 6).

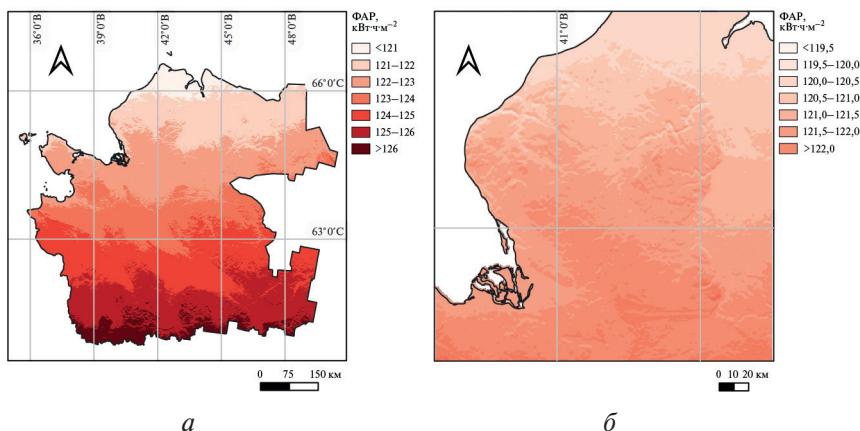


Рис. 6. Распределение ФАР за июль 2024 г.: а — регионально для территории Архангельской области; б — локально для Беломорско-Кулойского плато

На рис. 6 видно, как особенности рельефа территории вносят корректировки в широтную тенденцию распределения ФАР при переходе от регионального (Архангельская область) к локальному (Беломорско-Кулойское плато) уровню.

На рис. 7 показана блок-схема алгоритма построения цифровых карт распределения ФАР в программном обеспечении SAGA GIS.

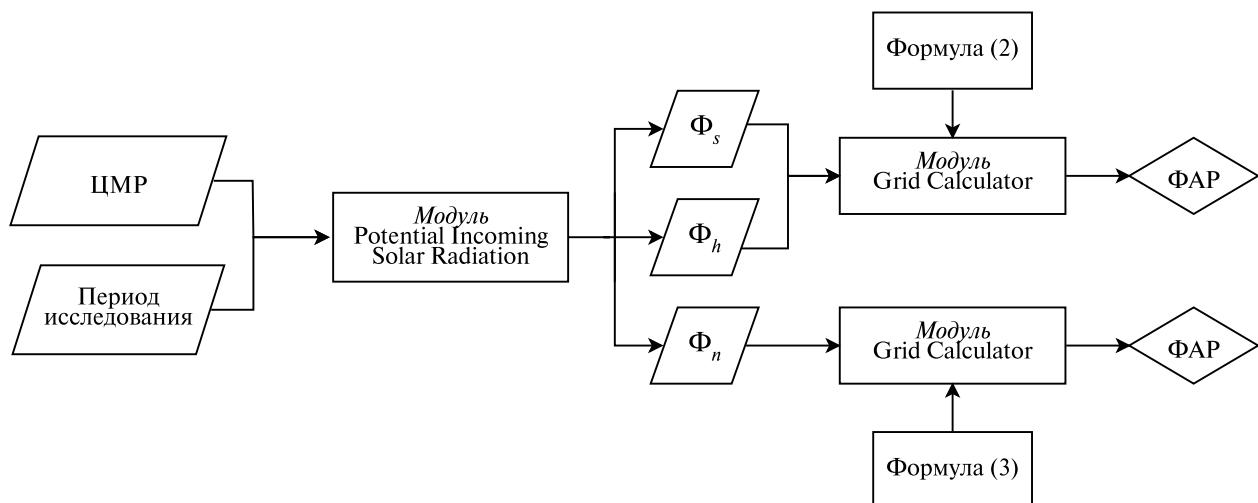


Рис. 7. Блок-схема алгоритма построения ФАР в программном обеспечении SAGA GIS.
(2) — формула Росса – Тoomинга, (3) — сокращённая формула Росса – Тoomинга

Выводы

Таким образом, широтная закономерность распределения ФАР, которая на глобальном уровне определяется, в первую очередь, геометрией Земли и её вращением вокруг Солнца, а также атмосферным поглощением, на региональном и, особенно, на локальном уровне пре-терпевает значительные корректировки. Здесь уже рельеф выступает ключевым фактором, изменяющим радиационный режим. Топографические особенности, выраженные в геомор-фометрических параметрах рельефа, создают уникальные микроклиматические условия, влияющие на доступность тепла и света для растительности, что позволяет, например, опти-мизировать размещение лесных насаждений для повышения их продуктивности, укрепле-ния жизнестойкости и устойчивости к неблагоприятным факторам среды. Также понимание особенностей пространственного распределения солнечной радиации позволяет более раци-онально использовать природные ресурсы, грамотно проводить сельскохозяйственное и зем-леустроительное планирование, инфраструктурное проектирование, экологический монито-ринг экзогенных процессов и явлений.

Проведённый анализ показал, что в условиях обширных бореальных равнин, какая является Архангельская область, влияние рельефа на распределение ФАР статистически значимо. При этом внутри рельефа ключевую роль играют абсолютная высота и экспозиция склона, тогда как эффект затенения и взаимной расчленённости форм статистически незначим.

Исследование проведено в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН номер гос. регистрации 125022502869-4.

Литература

1. Асадов Х. Г., Маммадова У. Ф., Эминов Р. А. Метод определения коэффициента мутности атмосферы Линке с помощью солнечно-фотометрических измерений // Гелиогеофиз. исслед. 2021. № 29. С. 18–23. DOI: 10.54252/2304-7380_2021_29_18.

2. *Вазюля С. В., Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Артемьев В. А.* Валидация алгоритмов оценки фотосинтетически активной радиации на поверхности моря по спутниковым данным // Соврем. проблемы оптики естественных вод. 2015. Т. 8. С. 152–156.
3. *Копелевич О. В., Буренков В. И., Вазюля С. В., Шеберстов С. В., Набиуллина М. В.* Оценка баланса фотосинтетически активной радиации в Баренцевом море по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS // Океанология. 2003. Т. 43. № 6. С. 834–845.
4. *Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Полякова Е. В., Чистова З. Б.* Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и её подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области). Пенза: «Социосфера», 2019. 177 с.
5. *Матюшевская Е. В.* Изменчивость фотосинтетически активной радиации за 1954–2013 гг. в центральной части Беларуси // Вестн. БГУ. Сер. 2: Химия. Биология. География. 2015. № 3. С. 63–70.
6. *Мешик О. П., Борушко М. В.* Моделирование фотосинтетически активной радиации в условиях республики Беларусь // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. 2024. № 3(135). С. 85–90. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-135-3-85-90.
7. *Молдау Х., Росс Ю., Тооминг Х., Ундла Н.* Географическое распределение фотосинтетически активной радиации (ФАР) на территории европейской части СССР // Фотосинтез и вопросы продуктивности растений: сб. ст. / под ред. А. А. Ничипоровича. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 145–158.
8. *Русскова Т. В., Скороходов А. В.* Алгоритм восстановления оптической толщины однослоиной горизонтально неоднородной облачности с использованием нейронной сети // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 88–105. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-88-105.
9. *Тооминг Х. Г., Гуляев Б. И.* Методика измерения фотосинтетически активной радиации. М.: Наука, 1967. 144 с.
10. *Шиловцева О. А., Дьяконов К. Н., Балдина Е. А.* Косвенные методы расчёта суммарной фотосинтетически активной радиации по данным актинометрических и метеорологических наблюдений // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 37–47.
11. *Alados I., Foyo-Moreno I., Alados-Arboledas L.* Photosynthetically active radiation: measurements and modelling // Agricultural and Forest Meteorology. 1996. V. 78. P. 121–131. DOI: 10.1016/0168-1923(95)02245-7.
12. *Bodhaine B. A., Wood N. B., Dutton E. G., Slusser J. R.* On Rayleigh optical depth calculations // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 1999. V. 16. P. 1854–1861. DOI: 10.1175/1520-0426(1999)016<1854:ORODC>2.0.CO;2.
13. *Böhner J., Antonić O.* Land-surface parameters specific to topo-climatology // Developments in Soil Science. 2009. V. 33. P. 195–226. DOI: 10.1016/s0166-2481(08)00008-1.
14. *Deirmendjian D., Sekera Z.* Global radiation resulting from multiple scattering in a Rayleigh atmosphere // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 1954. V. 6(4). P. 382–398. DOI: 10.3402/tellusa.v6i4.8756.
15. *Frouin R., Pinker R. T.* Estimating photosynthetically active radiation (PAR) at the earth's surface from satellite observations // Remote Sensing of Environment. 1995. V. 51. P. 98–107. DOI: 10.1016/0034-4257(94)00068-X.
16. *Frouin R., McPherson J., Ueyoshi K., Franz B.* A time series of photosynthetically available radiation at the ocean surface from SeaWiFS and MODIS data // Remote Sensing of the Marine Environment II. 2012. V. 8525. P. 234–245. DOI: 10.1111/12.981264.
17. *Hofierka J., Šúri M.* The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications // Proc. Open Source GIS-GRASS Users Conf. Italy, 2002. P. 51–70.
18. *Kumar L., Skidmore A. K., Knowles E.* Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment // Intern. J. Geographical Information Science. 1997. V. 11(5). P. 475–497. DOI: 10.1080/136588197242266.
19. *Louche A., Peri G., Iqbal V.* An analysis of Linke turbidity factor // Solar Energy. 1986. V. 37. P. 393–396. DOI: 10.1016/0038-092X(86)90028-9.
20. *Mei X., Fan W., Mao X.* Analysis of impact of terrain factors on landscape-scale solar radiation // Intern. J. Smart Home. 2015. V. 9(10). P. 107–116. DOI: 10.14257/ijsh.2015.9.10.12.
21. *Nwokolo S. C., Amadi S. O.* A global review of empirical models for estimating photosynthetically active radiation // Trends in Renewable Energy. 2018. V. 4(2). P. 236–327. DOI: 10.17737/tre.2018.4.2.0079.
22. *Pinker R. T., Laszlo I.* Global distribution of photosynthetically active radiation as observed from satellites // J. Climate. 1992. V. 5(1). P. 56–65. DOI: 10.1175/1520-0442(1992)005<0056:GDOPAR>2.0.CO;2.
23. *Pons X., Ninyerola M.* Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data // Intern. J. Climatology. 2008. V. 28(13). P. 1821–1834. DOI: 10.1002/joc.1676.

24. Viña A., Gitelson A.A. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32(17). Article L17403. 4 p. DOI: 10.1029/2005GL023647.
25. Zakšek K., Podobnikar T., Oštir K. Solar radiation modelling // Computers and Geosciences. 2005. V. 31(2). P. 233–240. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.09.018.

Algorithm for modeling photosynthetically active radiation of the Sun based on the ASTER GDEM v2 model (on the example of Arkhangelsk Region)

A. L. Mineev¹, E. V. Polyakova^{1,2}, Yu. G. Kutinov¹, Z. B. Chistova¹, I. N. Bolotova¹

¹ N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UrB RAS
Arkhangelsk 163020, Russia
E-mail: mineew.al@gmail.com

² Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

The article analyzes the energy of solar radiation reaching the Earth's surface. It is shown that it is determined by three groups of factors: the geometry of the Earth and its rotation around the Sun; atmospheric absorption; and terrain relief. The influence of these groups of factors on the redistribution of the solar radiation flux at the global, regional and local levels is considered. It is established that at the regional and, especially, local levels, it is the terrain relief that is the main factor influencing the redistribution of solar energy. Also, a modeling of three components of short-wave solar radiation — direct, scattered and reflected, modified under the influence of terrain relief, is carried out. The obtained calculations are used in modeling photosynthetically active radiation (PAR), as part of solar radiation in the range from 400 to 700 nm, used by plants for photosynthesis. As a result, a step-by-step algorithm for constructing PAR was formed based on the ASTER GDEM v2 digital elevation model, adapted for Arkhangelsk Region, in the SAGA GIS geoinformation system. It is shown that when moving from the global (planetary) level through the regional (Arkhangelsk Region) to the local (White Sea-Kuloy Plateau) level, the features of terrain relief make adjustments to the latitudinal trend of PAR distribution.

Keywords: digital elevation model, DEM, shortwave solar radiation, photosynthetically active radiation, Arkhangelsk Region

Accepted: 30.09.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-66-78

References

1. Asadov Kh. G., Mammadova U. F., Eminov R. A., The method for determination of Linke atmospheric turbidity coefficient by sun photometric measurements, *Geliogeofizicheskie issledovaniya*, 2021, No. 29, pp. 18–23 (in Russian), DOI: 10.54252/2304-7380_2021_29_18.
2. Vazyulya S. V., Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Artem'ev V. A., Validation of algorithms for estimation of photosynthetically active radiation at the sea surface from satellite data, *Sovremennye problemy optiki estestvennykh vod*, 2015, V. 8, pp. 152–156 (in Russian).
3. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Vazyulya S. V., Sheberstov S. V., Nabiullina M. V., An assessment of the photosynthetically active radiance balance in the Barents Sea from the data of the SeaWiFS satellite color scanner, *Oceanology*, 2003, V. 43, No. 6, pp. 834–845 (in Russian).
4. Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Polyakova E. V., Chistova Z. B., *Vybor bazovoi tsifrovoi modeli rel'efa (TsMR) ravninnnykh territorii Severa Evrazii i ee podgotovka dlya geologicheskogo raionirovaniya (na primere Arkhangelskoi oblasti)* (The choice of the basic digital elevation model (DEM) of the plain territories of the North of Eurasia and its preparation for geological zoning (on the example of the Arkhangelsk region)), Penza, “Sotsiosfera”, 2019, 177 p. (in Russian).

5. Matyushevskaya E. V., Variability of photosynthetically active radiation in 1954–2013 in the central part of Belarus, *Vestnik BGU. Ser. 2: Khimiya. Biologiya. Geografiya*, 2015, No. 3, pp. 63–70 (in Russian).
6. Meshik O. P., Borushko M. V., Modelling photosynthetically active radiation in Belarus, *Vestnik of Brest State Technical Univ.*, 2024, No. 3(135), pp. 85–90 (in Russian), DOI: 10.36773/1818-1112-2024-135-3-85-90.
7. Moldau Kh., Ross Yu., Tooming Kh., Undla N., Geographical distribution of photosynthetically active radiation (PAR) in the European part of the USSR, In: *Fotosintez i voprosy produktivnosti rastenii: sbornik statei* (Photosynthesis and plant reproduction: a collection of articles), A. A. Nichiporovich (ed.), Moscow: AN SSSR, 1963, pp. 145–158 (in Russian).
8. Russkova T. V., Skorokhodov A. V., Algorithm for retrieving the optical depth of single-layer horizontally inhomogeneous clouds using a neural network, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 88–105 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-88-105.
9. Tooming Kh. G., Gulyaev B. I., *Metodika izmereniya fotosinteticheski aktivnoi radiatsii* (Methodology for measuring photosynthetically active radiation), Moscow: Nauka, 1967, 144 p. (in Russian).
10. Shilovtseva O. A., D'yakonov K. N., Baldina E. A., Indirect methods for calculating total photosynthetically active radiation based on actinometric and meteorological observations, *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2005, No. 1, pp. 37–47 (in Russian).
11. Alados I., Foyo-Moreno I., Alados-Arboledas L., Photosynthetically active radiation: measurements and modelling, *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, V. 78, pp. 121–131, DOI: 10.1016/0168-1923(95)02245-7.
12. Bodhaine B. A., Wood N. B., Dutton E. G., Slusser J. R., On Rayleigh optical depth calculations, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, V. 16, pp. 1854–1861, DOI: 10.1175/1520-0426(1999)016<1854:ORODC>2.0.CO;2.
13. Böhner J., Antonić O., Land-surface parameters specific to topo-climatology, *Developments in Soil Science*, 2009, V. 33, pp. 195–226, DOI: 10.1016/s0166-2481(08)00008-1.
14. Deirmendjian D., Sekera Z., Global radiation resulting from multiple scattering in a Rayleigh atmosphere, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1954, V. 6(4), pp. 382–398, DOI: 10.3402/tellusa.v6i4.8756.
15. Frouin R., Pinker R. T., Estimating photosynthetically active radiation (PAR) at the earth's surface from satellite observations, *Remote Sensing of Environment*, 1995, V. 51, pp. 98–107, DOI: 10.1016/0034-4257(94)00068-X.
16. Frouin R., McPherson J., Ueyoshi K., Franz B., A time series of photosynthetically available radiation at the ocean surface from SeaWiFS and MODIS data, *Remote Sensing of the Marine Environment II*, 2012, V. 8525, pp. 234–245, DOI: 10.1111/12.981264.
17. Hofierka J., Šúri M., The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications, *Proc. Open Source GIS-GRASS Users Conf.*, Italy, 2002, pp. 51–70.
18. Kumar L., Skidmore A. K., Knowles E., Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment, *Intern. J. Geographical Information Science*, 1997, V. 11(5), pp. 475–497, DOI: 10.1080/136588197242266.
19. Louche A., Peri G., Iqbal V., An analysis of Linke turbidity factor, *Solar Energy*, 1986, V. 37, pp. 393–396, DOI: 10.1016/0038-092X(86)90028-9.
20. Mei X., Fan W., Mao X., Analysis of impact of terrain factors on landscape-scale solar radiation, *Intern. J. Smart Home*, 2015, V. 9(10), pp. 107–116, DOI: 10.14257/ijsh.2015.9.10.12.
21. Nwokolo S. C., Amadi S. O., A global review of empirical models for estimating photosynthetically active radiation, *Trends in Renewable Energy*, 2018, V. 4(2), pp. 236–327, DOI: 10.17737/tre.2018.4.2.0079.
22. Pinker R. T., Laszlo I., Global distribution of photosynthetically active radiation as observed from satellites, *J. Climate*, 1992, V. 5(1), pp. 56–65, DOI: 10.1175/1520-0442(1992)005<0056:GDOPAR>2.0.CO;2.
23. Pons X., Ninyerola M., Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data, *Intern. J. Climatology*, 2008, V. 28(13), pp. 1821–1834, DOI: 10.1002/joc.1676.
24. Viña A., Gitelson A. A., New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops, *Geophysical Research Letters*, 2005, V. 32(17), Article L17403, 4 p., DOI: 10.1029/2005GL023647.
25. Zásek K., Podobník T., Oštrík K., Solar radiation modelling, *Computers and Geosciences*, 2005, V. 31(2), pp. 233–240, DOI: 10.1016/j.cageo.2004.09.018.