

Расчеты поступления солнечной радиации на склоны в период снеготаяния

А. А. Шайдулина 

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Российская Федерация
(614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15)

Аннотация: Цель настоящей работы – рассчитать величину плотности теплового потока, поступающего на склоны речных водосборов Прикамья разной экспозиции и крутизны в период снеготаяния.

Материалы и методы. Исходными картографическими данными являются слои векторных топографических карт Роскартографии масштаба 1:200000. Расчеты солнечной радиации выполнены с построением цифровых моделей рельефа для двух речных водосборов Пермского Прикамья, относящихся к равнинной (река Коса – село Коса) и предгорной (река Вишера – деревня Рябиново) территориям. Метод исследования – математико-геоинформационное моделирование в программе ArcGIS 10.4.

Результаты и обсуждение. Получены закономерности распределения солнечной радиации по территории исследуемых водосборов в период снеготаяния. Экспозиция склонов влияет на распределение солнечной радиации на водосборе. Установлено, что западные, восточные склоны и равнинные территории получают почти равное количество солнечной радиации, которое увеличивается в течение апреля и не зависит от угла наклона склонов. Максимальные значения инсоляции приходятся на южные, а минимальные – на северные склоны. Расчеты ежедневной динамики инсоляции в течение апреля показали, что для южных склонов поступающая радиация будет уменьшаться, а для северных – увеличиваться относительно западных и восточных склонов. Это изменение одинаково по величине, но имеет разный знак.

Выводы. Расчеты инсоляции на основе качественных цифровых моделей рельефа позволяют выявить пространственную неоднородность приходящего с солнечной радиацией количества тепла на склоны разной экспозиции и крутизны. Рельеф оказывает значительное влияние на длительность процессов снеготаяния. Так, на южных склонах с увеличением угла наклона количество приходящей солнечной радиации увеличивается, а на северных – уменьшается, что приводит к более позднему стаиванию (в среднем на 18 – 20 дней) снега на них.

Ключевые слова: солнечная радиация, математико-геоинформационное моделирование, экспозиция и крутизна склонов, снеготаяние.

Для цитирования: Шайдулина А. А. Расчеты поступления солнечной радиации на склоны в период снеготаяния // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2022, № 1, с. 50-58. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2022.1/9085>

ВВЕДЕНИЕ

Основным климатообразующим фактором, влияющим на интенсивность процессов снеготаяния, является поступление солнечной радиации. Радиационный режим отражает особенности климата и рельефа территории, поскольку определяется географической широтой, высотой над уровнем мирового океана, прозрачностью атмосферы, степенью облачности, продолжительностью солнечного сияния и меняется с экспозици-

ей и крутизной склонов [11]. Рельеф определяет неравномерность пространственного распределения освещенности и, следовательно, приходящего с солнечной радиацией количества тепла на склоны. Это оказывает значительное влияние на температуру воздуха и прогреваемость подстилающей поверхности, а следовательно, и интенсивность процессов снеготаяния.

Расчет величины солнечной радиации возможен как традиционным методом, описанным в [5],



так и с применением математико-геоинформационного моделирования. Использовать для оценки величины солнечной радиации фактические данные с метеостанций в настоящее время, в связи с сокращением пунктов наблюдательной сети, практически невозможно. Так, на территории Пермского Прикамья, располагающегося в пределах бассейна Воткинского водохранилища, актинометрические наблюдения ведутся только на метеостанции Чермоз, что дает представление об инсоляции территории в целом, без учета индивидуальных особенностей радиационного режима конкретного водосбора. Применение математико-геоинформационного моделирования позволяет рассчитать величину плотности теплового потока ($Вт/м^2$), поступающего на склоны разной экспозиции и крутизны на любую дату. Исследования выполнены на примере двух бассейнов до

створов гидрологических постов (г/п), относящихся к равнинной (г/п Коса-Коса, $A=6221 км^2$) и горной (г/п Вишера-Рябинино, $A=31084 км^2$) частям территории водосбора Воткинского водохранилища (рис. 1). Исходными картографическими данными являются слои векторных топографических карт Роскартографии масштаба 1:200000.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математико-геоинформационное моделирование процессов инсоляции выполнено с применением современных программных продуктов, к которым относится ArcGIS. Инструмент Solar Analyst модуля Spatial Analyst программного продукта ArcGIS основан на модели Solar Flux, имитирующей влияние наложения тени от объектов, тем самым влияя на поступление прямой солнечной радиации [12, 13].

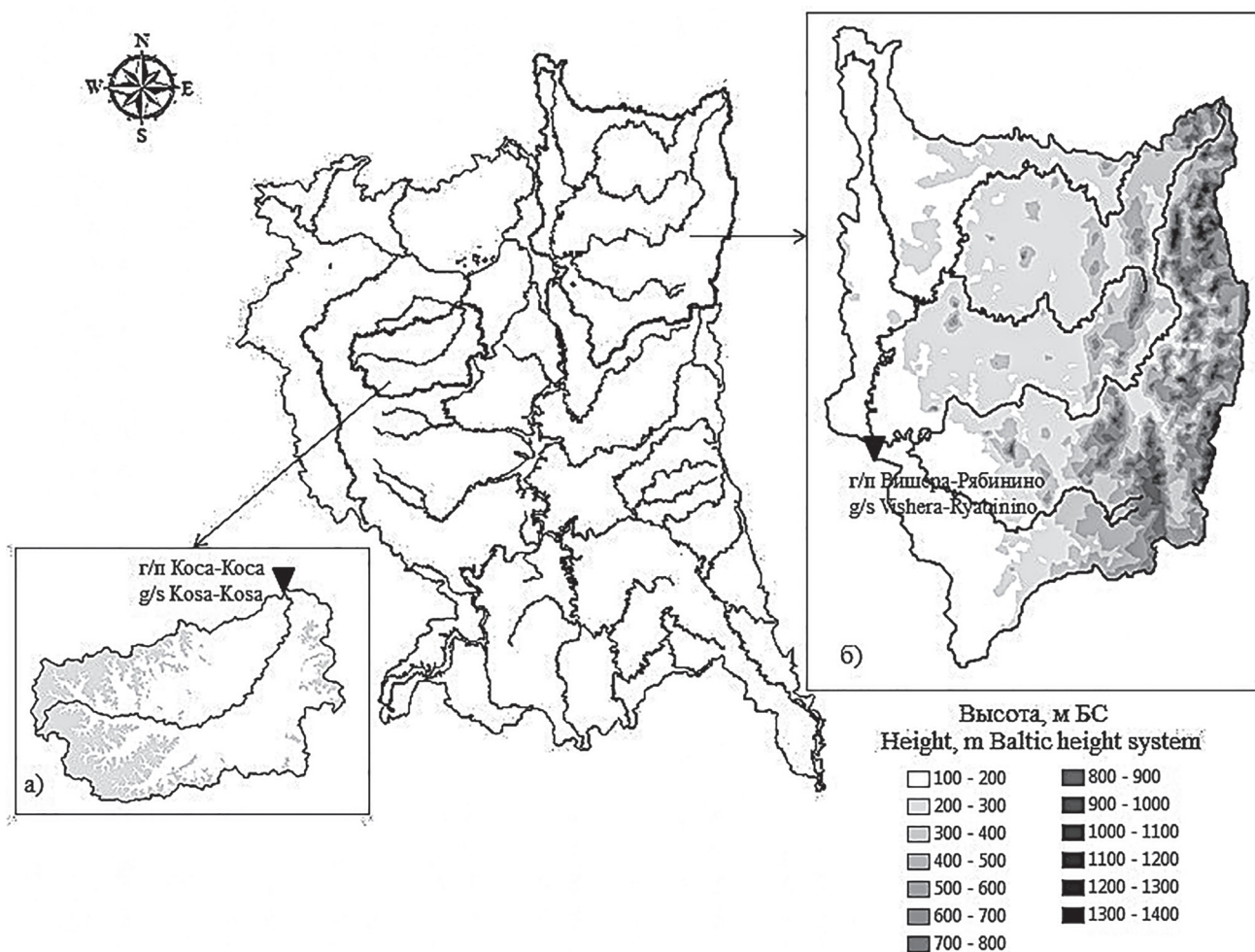


Рис. 1. Положение водосборов и ЦМР реки Косы (а) и реки Вишеры (б) в пределах бассейна Воткинского водохранилища
[Fig. 1. Position of the Kosa River (a) and digital relief model of the Vishera River catchments (b) within the Votkinskoye reservoir basin]

Solar Analyst представляет возможности для расчета солнечного излучения на основании цифровой модели рельефа (ЦМР) с использованием алгоритмов получения полусферической зоны видимости [8]. ЦМР является растровым представлением непрерывной поверхности, точность построения которой определяется в первую очередь разрешением (линейными размерами ячеек раstra) [1]. Одним из наиболее эффективных программных инструментов, специально разработанных для создания гидрологически корректных ЦМР, является модуль *Terrain to Raster* в составе ArcGIS [7]. Применение этого модуля позволяет максимально использовать всю имеющуюся картографическую информацию с характеристиками высот поверхностей (изолинии, характерные точки рельефа, локальные понижения, речную и озерную сеть и т.д.) [9]. Для реализации исследований были построены ЦМР с разрешением 100*100 (водосбор г/п Коса-Коса) и 300*300 (водосбор г/п Вишера-Рябинино).

Под математико-геоинформационным моделированием величины плотности теплового потока

(Вт/м²), поступающего в апреле на склоны разной экспозиции и крутизны, понимается автоматизированный расчет пространственного распределения плотности теплового потока для каждой растровой ячейки территории водосбора. Вычисление плотности теплового потока с применением ГИС-технологий выполнено для апреля с шагом в 4 дня инструментом «Область солнечного излучения» [8]. Для выполнения расчетов в программе выбирается день календаря и вводится начальное и конечное время. Если начальное и конечное время одинаковы, то будет рассчитана мгновенная инсоляция. Когда начальное время наступает раньше времени восхода солнца и конечное время наступает позже захода солнца, то инсоляция будет рассчитана для всего дня. Поправка на долготу и временную зону происходит автоматически [8]. Итогом расчета являются модельные растровые карты пространственного распределения солнечной радиации со значениями в Вт/м² за конкретный день. Для корректного отображения полученных результатов эти значения нужно поделить на протяженность светового дня, используемую в расчетах (рис. 2).

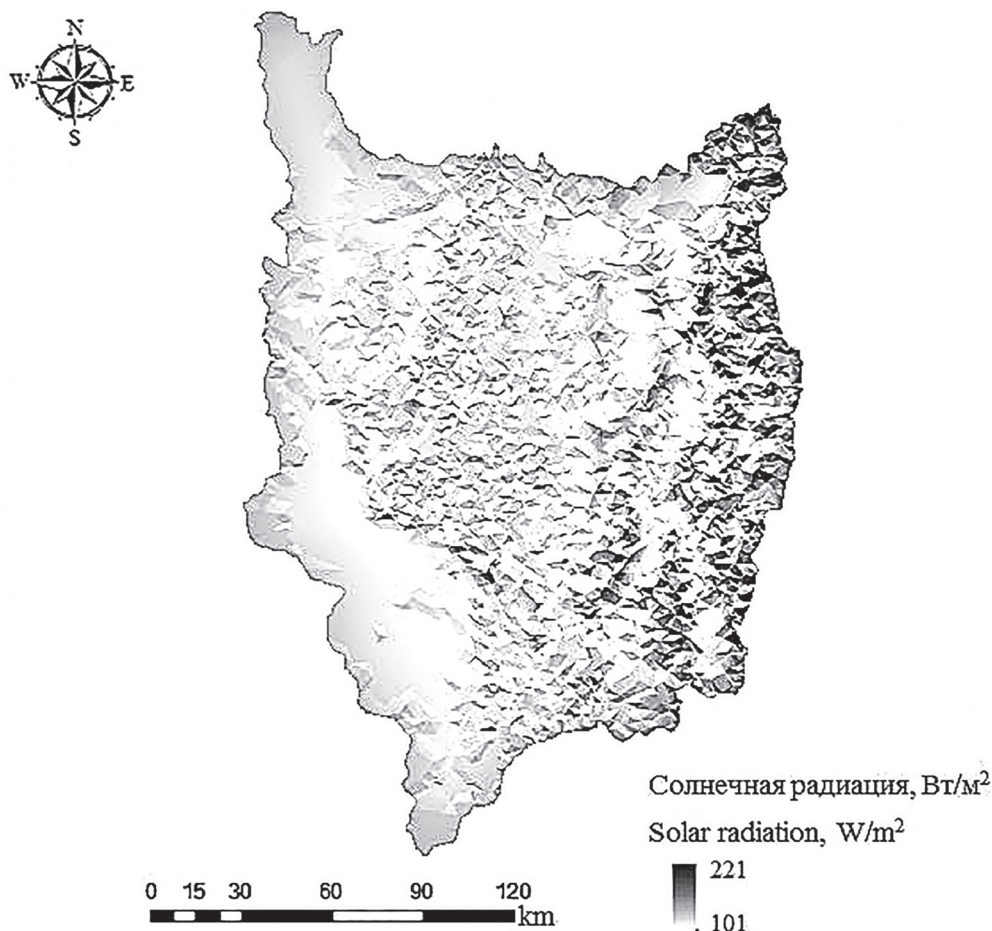


Рис. 2. Расчетный растр средних значений солнечной радиации для водосбора реки Вишеры на 01 апреля
 [Fig. 2. Calculated raster of solar radiation average values for the catchment area of the Vishera River on April 01]

Для проверки полученных результатов использованы данные Справочника [10] по суммарной радиации (кал/см² сутки) ближайшей метеостанции Высокая Дубрава в Свердловской области.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В средних широтах значение потока солнечного излучения достигает 800 Вт/м² летом, снижаясь до 250-300 Вт/м² зимой. Ночью это значение равно 0. Расчеты плотности теплового потока с применением ГИС-технологий показали, что в полуденные часы значения для исследуемых водосборов достигают 350 Вт/м² в начале периода, и 500 Вт/м² в конце месяца. В среднем за день значение теплового потока для водосбора г/п Коса-Коса составляет 149 Вт/м², в конце 229 Вт/м²; для водосбора г/п Вишера-Рябинино

в начале апреля – 161 Вт/м², а в конце 239 Вт/м². Для метеостанции Высокая Дубрава, находящейся южнее (56°45' с.ш.) значения суммарной радиации в апреле составляют 356 кал/см² за сутки [10].

На основе результатов моделирования выполнена оценка поступления солнечной радиации на склоны разной экспозиции и крутизны. Для водосбора реки Косы характерно преобладание северных (27%) и восточных (28%) склонов. Южные и западные склоны занимают 23 и 22% территории соответственно. На долю плоско-равнинных территорий приходится менее 1% (рис. 3а). Для водосбора реки Вишеры отмечается следующее деление по экспозиции: плоско-равнинный рельеф – 24%, север – 17%, восток – 17%, юг – 18% и запад – 24% (рис. 3б).

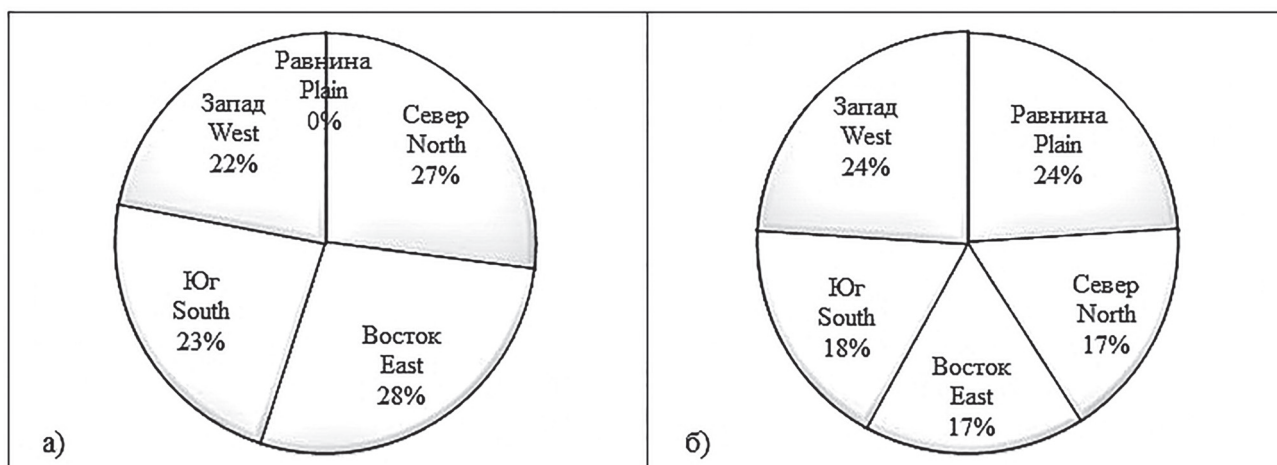


Рис. 3. Доля склонов разной экспозиции для водосборов реки Косы (а) и реки Вишеры (б)
 [Fig. 3. Proportion of slopes of different exposures for the catchments of the Kosa River (a) and the Vyshera River (b)]

Анализ показал, что поступление солнечной радиации на равнину, западные и восточные склоны в течение всего исследуемого периода практически совпадает, равномерно увеличиваясь для водосбора реки Косы от 149 до 267 Вт/м², а для водосбора реки Вишеры – от 154 до 273 Вт/м². Максимальные значения солнечной радиации приходятся на южные, а минимальные – на северные склоны. Для обоих водосборов отмечена закономерность: при принятии значений поступающей инсоляции на западные и восточные склоны (они всегда равны друг другу) в конкретный день равными единице, для юга поступающая радиация будет больше, а для севера – меньше. Это изменение одинаково по величине, но имеет разный знак. При расчете такой динамики в течение апреля для южных склонов поступающая радиация будет уменьшаться, а для северных – увеличиваться относительно западных и восточных склонов (рис. 4). Для оценки достовер-

ности полученных данных месячной (или средней суточной) суммы прямой радиации, можно использовать коэффициент *k* (табл. II Справочника) [10], выражающий отношение суммы радиации на южную стену к сумме радиации на горизонтальную поверхность. Для апреля и 60° с.ш. (северной широты) он составляет 1,03, а на 56° с.ш. – 0,90. Полученные значения солнечной радиации для плоско-равнинной (горизонтальной) поверхности для водосбора реки Вишеры, центр тяжести которого находится почти на 60° с.ш., и водосбора реки Косы (центр тяжести которого – на 59,58° с.ш.) подтверждают это отношение для южных склонов (рис. 4).

Рассматриваемые водосборы относятся к равнинной (река Коса) и предгорной (река Вишера) территориям, что определяет такую особенность их рельефа как крутизна (угол наклона) склонов. Классификация крутизны склонов при расчетах

принята по Н. И. Николаеву [6]: очень пологие 2-6°, пологие 6-15°, средней крутизны 15-30°. Для тер-

риторий со значениями угла наклона 0-2° принято обозначение «плоско-равнинный рельеф» (табл. 1).

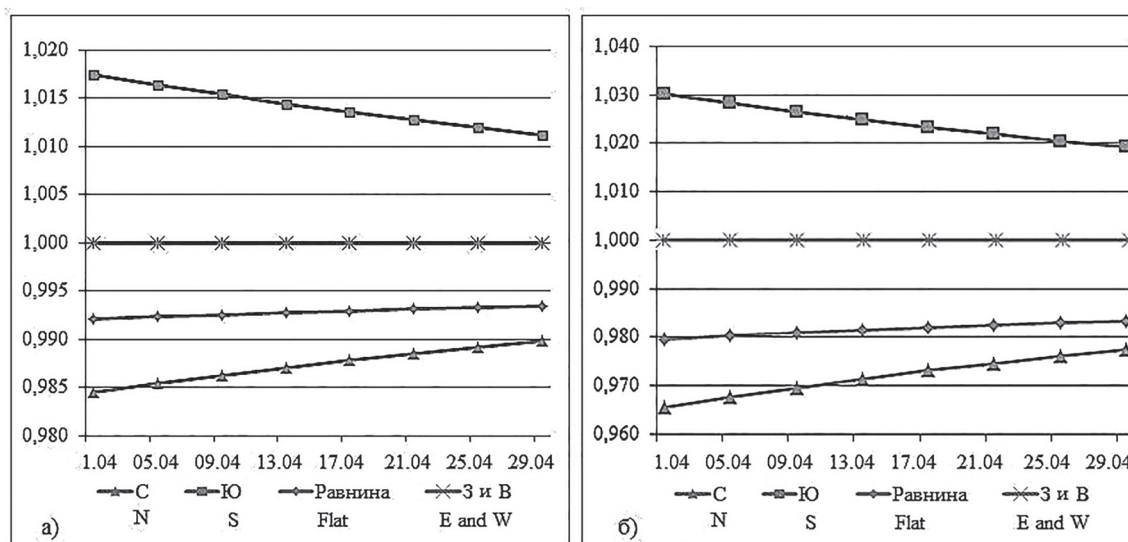


Рис. 4. Динамика поступления солнечной радиации на склоны разной экспозиции для водосборов рек Косы (а) и Вишеры (б)

[Fig. 4. Dynamics of solar radiation on slopes of different exposures for the Cosa (a) and Vishera (b) river catchments (b)]

Таблица 1

Площадь водосборов (%), приходящаяся на склоны разной экспозиции и крутизны [Table 1. Catchment area (%) attributable to slopes of different exposure and steepness]

Характеристика / Characteristics	Гидрологический пост река Коса – село Коса / Hydrological station Kosa River – Kosa village			Гидрологический пост река Вишера – деревня Рябиново / Hydrological station Vishera River – Ryabinino village			
	0-2°	2-6°	6-15°	0-2°	2-6°	6-15°	15-30°
Средний угол наклона, ° / Average tilt angle, °	0,7	2,7	6,2	0,7	3,4	8,1	17,2
Плоско-равнинная территория, % площади / Flat territory, % of the area	0,0	0,0	0,000	24,3	0,0	0,0	0,000
Север, % площади / North, % of the area	23,0	4,2	0,001	10,7	5,5	0,9	0,012
Восток, % площади / East, % of the area	24,6	3,2	0,000	9,5	6,1	1,3	0,010
Юг, % площади / South, % of the area	18,6	4,2	0,001	11,4	5,2	1,0	0,006
Запад, % площади / West, % of the area	17,9	4,3	0,001	12,8	9,0	2,1	0,047
Сумма по сторонам горизонта, % площади / Sum on the sides of the horizon, % of the area	84,1	15,9	0,003	68,7	25,9	5,3	0,074

Как видно из табл. 1, рассматриваемые водосборы имеют преимущественно плоско-равнинный рельеф. При этом угол наклона склонов водосбора реки Вишеры может достигать 30°, тогда как для водосбора реки Косы не превышает 15°.

Расчеты поступления солнечной радиации на склоны в зависимости от их экспозиции и крутизны (рис. 5) показали особенность, присущую обоим водосборам: на западные и восточные склоны поступает одинаковое количество радиации, которое

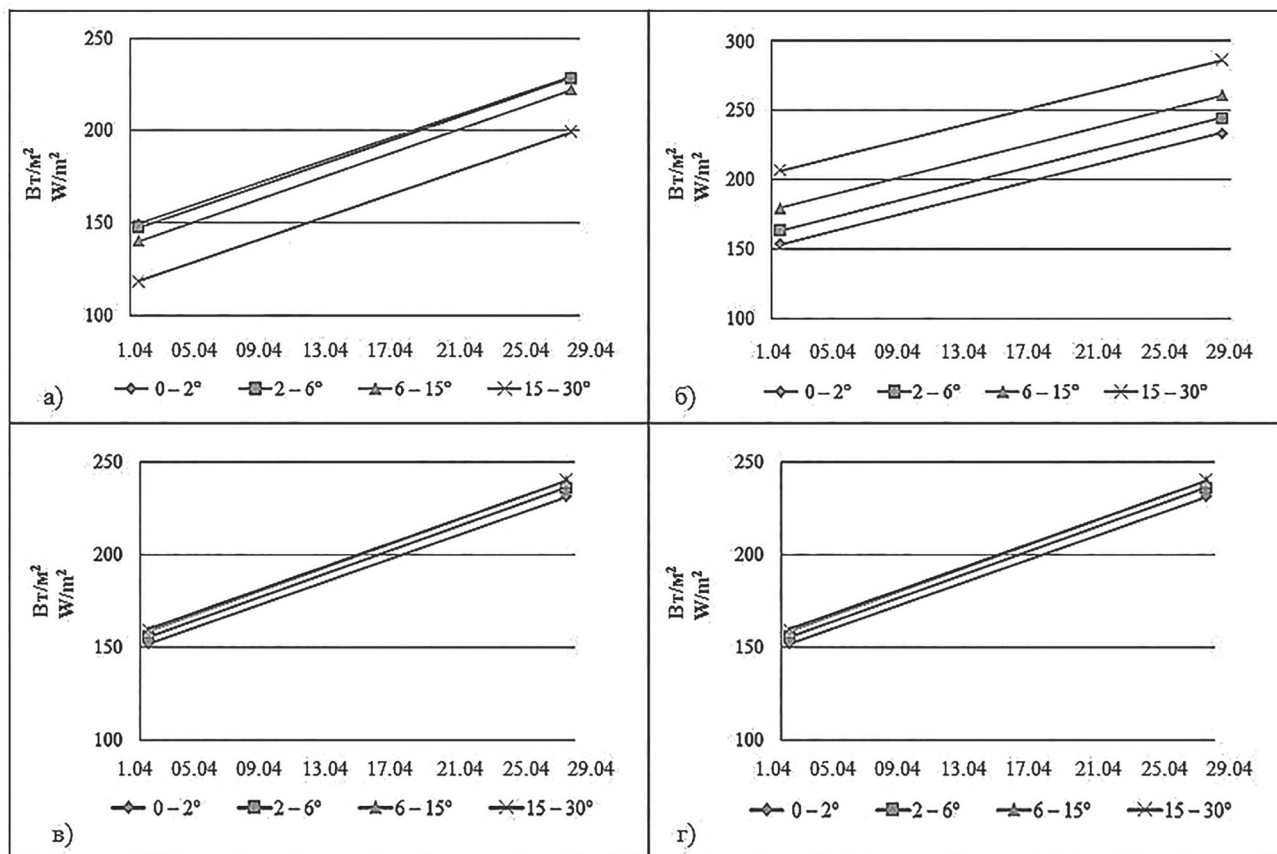


Рис. 5. Поступление солнечной радиации на склоны водосбора реки Вишеры разной экспозиции (а – север, б – юг, в – запад, г – восток) и крутизны [Fig. 5. Solar radiation on the slopes of the Vishera river catchment area of different exposures (a – north, b – south, c – west, d – east) and steepness]

увеличивается в течение апреля и увеличивается с углом наклона склонов (г/п Коса-Коса от 148 до 229 Вт/м²; г/п Вишера-Рябинино от 151 до 241 Вт/м²).

Для южных и северных склонов выявлена следующая закономерность: с увеличением угла наклона южных склонов количество солнечной радиации для них увеличивается (г/п Коса-Коса: 151-164 Вт/м² в начале апреля, 230-243 Вт/м² в

конце; г/п Вишера-Рябинино: 154-159 Вт/м² в начале апреля, 234-286 Вт/м² в конце), а для северных – уменьшается (г/п Коса-Коса: 147-136 Вт/м² в начале апреля, 227-215 Вт/м² в конце; г/п Вишера-Рябинино: 148-118 Вт/м² в начале апреля, 228-199 Вт/м² в конце). Последнее связано с увеличением затененности северных склонов по мере увеличения их крутизны, и сказывается на увели-

Таблица 2

Средние даты схода снежного покрова на водосборах г/п Вишера-Рябинино и г/п Коса-Коса за 2004, 2010, 2015 годы [Table 2. Average dates of snow cover in the catchments of the Vishera-Ryabinino g/s and the Kosa-Kosa g/s for 2004, 2010, 2015]

Год / Years	Гидрологический пост Река Коса – село Коса / Hydrological station Kosa River – Kosa village		Гидрологический пост река Вишера – деревня Рябинино / Hydrological station Vishera River – Ryabinino village	
	Северные склоны / Northern slopes	Южные склоны / Southern slopes	Северные склоны / Northern slopes	Южные склоны / Southern slopes
2004	04.06	06.05	19.06	08.06
2010	09.05	18.04	30.05	16.05
2015	17.05	30.04	10.06	23.05

чении длительности процессов снеготаяния этих участков водосборов. Это подтверждают исследования времени стаивания снежного покрова на склонах южной и северной экспозиции на горном и равнинном водосборах, выполненные по модели [2, 3, 4]. Для этого применялся следующий алгоритм: 1) построение отдельных растровых слоев склонов северной и южной экспозиции; 2) анализ таблиц с оставшимся снежным покровом на даты периода снеготаяния путем сортировок и запросов в ПО ArcGIS; 3) построение модельных карт оставшегося снежного покрова на выбранные в п. «2» даты и их визуальное подтверждение путем сравнения с растрами экспозиции.

В табл. 2 приведены средние даты схода снежного покрова для водосборов г/п Вишера-Рябинино и г/п Коса-Коса за несколько лет.

Из таблицы 2 видно, что на склонах южной экспозиции снег сходит в среднем на 18-20 дней раньше, чем на северной. Период стаивания для водосбора Вишеры может продолжаться до третьей декады июня.

ВЫВОДЫ

1. Поступление солнечной радиации на территорию речных водосборов можно оценить методом математико-геоинформационного моделирования с применением инструмента Solar Analyst программного продукта ArcGIS на основании корректной ЦМР.

2. Экспозиция склонов влияет на распределение солнечной радиации на водосборе. Максимальные значения солнечной радиации приходятся на южные, а минимальные – на северные склоны. Западные и восточные склоны получают равное количество солнечной радиации, и чуть меньшие значения приходятся на равнину. Выявлена закономерность: при приравнивании значений поступающей инсоляции на западные и восточные склоны к единице, для юга поступающая радиация будет больше, а для севера – меньше. Это изменение одинаково по величине, но имеет разный знак. А расчеты ежедневной динамики в течение апреля показали, что для южных склонов поступающая радиация будет уменьшаться, а для северных – увеличиваться относительно западных и восточных склонов.

3. На западные и восточные склоны поступает одинаковое количество радиации, которое увеличивается в течение апреля и не зависит от степени их крутизны. На южных склонах с увеличением угла наклона количество приходящей солнечной радиации увеличивается, а на северных – умень-

шается. Это приводит к тому, что снег на северных склонах стаивает в среднем на 18 – 20 дней позже по сравнению с южными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин В. Г., Пьянков С. В. *Гидрография. Определение гидрографических характеристик рек и их водосборов с применением цифрового картографического моделирования: учеб. пособие. Ч. II*. Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т, 2013. 71 с.
2. Калинин В. Г., Суманева К. И., Русаков В. С. Моделирование пространственного распределения снежного покрова в период весеннего снеготаяния // *Метеорология и гидрология*, 2019, № 2, с. 74-85.
3. Калинин В. Г., Шайдулина А. А., Русаков В. С. и др. К вопросу об учете влияния экспозиции склонов в расчетах снеготаяния // *Материалы междунар. науч.-практ. оч.-заоч. конф. «Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках»*, 2021, с. 392-397.
4. Калинин В. Г., Шайдулина А. А., Русаков В. С. и др. О верификации модельных расчетов пространственного распределения снежного покрова в период снеготаяния // *Тр. VIII Всероссийской научно-практ. конф. «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов»*, 2021, с. 99-105.
5. *Методические указания по производству микроклиматических обследований в период изысканий* / под ред. Гольцберг И. А. Ленинград: Гидрометиздат, 1969. 63 с.
6. Николаев Н. И. *Новейшая тектоника и геодинамика литосферы*. Москва: Недра, 1988. 491 с.
7. Software «ArcGIS Spatial Analyst». – URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-spatial-analyst-toolbox.htm> (accessed 11.08.2021). – Text: electronic.
8. Software «ArcGIS Spatial Analyst». – URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-solar-radiation-tools.htm> (accessed 11.08.2021). – Text: electronic.
9. Пьянков С. В., Калинин В. Г. Метод вычисления линейных размеров растра и порогового значения сумм направлений стока при построении гидрологически корректных ЦМР // *Географический вестник*, 2017, № 1 (40), с. 138-145. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-138-145.
10. *Справочник по климату СССР, Вып. 9. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1967. 69 с.
11. Сюткин В. В. Моделирование инсоляции земной поверхности в среде ARCGIS // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7, Геоология. География*, 2011, № 4, с. 126-134.
12. Dubayah R., Rich P. M. GIS and Environmental Modeling: GIS-based solar radiation modeling // *Progress and Research Issues. GIS World Books*, 1996, pp. 129-134.

13. Dubayah R., Rich P. M. Topographic solar radiation models for GIS // *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9, pp. 405-419.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 11.08.2021

Принята к публикации 03.03.2022

UDC 551.521.1

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2022.1/9085>

Calculation of Solar Radiation on Slopes During Snowmelt

A. A. Shaydulina ✉

*Perm State National Research University, Russian Federation
(15, Bukireva Str., Perm, 614068)*

Abstract: The aim of this work is to calculate the value of heat flux density reaching the slopes of Kama River catchments of different exposition and steepness during snowmelt.

Materials and methods. The initial mapping data are layers of vector topographic maps of ROSKAR-TOGRAPHY at a scale of 1:200000. Calculations of solar radiation are made with the construction of digital elevation models for two river catchments of the Perm Kama region, belonging to the plain (the river Kos - Kos village) and foothill (the Vishera River - Ryabinino village) territories. The method of the study is mathematical and geoinformation modeling in ArcGIS 10.4 software.

Results and discussion. The patterns of solar radiation distribution over the territory of the studied catchments during the snowmelt period have been obtained. Slope exposure influences the distribution of solar radiation on the catchment area. It is established, that the western, eastern slopes and plain territories receive almost equal quantity of solar radiation, which increases during April and does not depend on a slope angle. The maximum insolation values occur on the southern slopes and the minimum on the northern slopes. Calculations of the daily insolation dynamics during April showed that for the southern slopes the incoming radiation will decrease, while for the northern slopes it will increase relative to the western and eastern slopes. This change is similar in magnitude, but has a different sign.

Conclusions. Calculations of insolation based on qualitative digital elevation models allow revealing spatial inhomogeneity of the amount of heat arriving with solar radiation on slopes of different exposition and steepness. The relief has a significant impact on the duration of snowmelt processes. Thus, the amount of incoming solar radiation increases on the southern slopes with an increase in the slope angle, while it decreases on the northern slopes, which leads to a later melting (on average, by 18-20 days) of snow on them.

Key words: solar radiation, mathematical geoinformation modelling, slope exposure and steepness, snowmelt.

For citation: Shaydulina A.A. Calculation of Solar Radiation on Slopes During Snowmelt. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2022, no. 1, pp. 50-58. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2022.1/9085>

REFERENCE

1. Kalinin V.G., P'yankov S.V. *Gidrografiya. Opredelenie gidrograficheskikh kharakteristik rek i ikh vosborov s primeneniem tsifrovogo kartograficheskogo modelirovaniya: ucheb. posobie. Ch. II.* [Determination of hydrographic characteristics of rivers and their catchments using digital cartographic modeling: textbook.

manual. Part II]. Perm: Perm. gos. nats. issl. un-t, 2013. 71 p. (In Russ.)

2. Kalinin V.G., Sumaneeva K.I., Rusakov V.S. Modelirovanie prostranstvennogo raspredeleniya snezhnogo pokrova v period vesennego snegotayaniya [Modeling of the spatial distribution of snow cover during the spring snowmelt]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2019, no. 2, pp. 74-85. (In Russ.)

© Shaydulina A.A., 2022

✉ Adeliya A. Shaydulina, e-mail: adelinash89@mail.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

3. Kalinin V.G., Shaydulina A.A., Rusakov V.S. i dr. K voprosu ob uchete vliyanija jekspozicii sklonov na raschetah snegotajaniya [Effects of slope exposition in calculations of snow melting]. *Sbornik докладов mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Razvitie geograficheskikh issledovanij v Belarusi v XX–XXI vekah*, 2021, pp. 392–397. (In Russ.)
 4. Kalinin V.G., Shaydulina A.A., Rusakov V.S. i dr. O verifikatsii model'nykh raschetov prostranstvennogo raspredeleniya snezhnogo pokrova v period snegotayaniya [Verification of model calculations of the spatial distribution of snow cover during snowmelt]. *Tr. VIII Vserossiyskoy nauchno-prakt. konf. «Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov»*, 2021, pp. 99–105. (In Russ.)
 5. *Metodicheskie ukazaniya po proizvodstvu mikroklimaticheskikh obsledovanij v period izyskaniy* [Methodological guidelines for the production of microclimatic surveys during the survey period] / pod red. Gol'tsberg I.A. Leningrad: Gidrometizdat, 1969. 63 p. (In Russ.)
 6. Nikolaev N.I. *Noveyshaya tektonika i geodinamika litosfery* [The latest tectonics and geodynamics of the lithosphere]. Moscow: Nedra, 1988. 491 p. (In Russ.)
 7. Software «ArcGIS Spatial Analyst». – URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-spatial-analyst-toolbox.htm> (accessed 11.08.2021). – Text: electronic.
 8. Software «ArcGIS Spatial Analyst». – URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-solar-radiation-tools.htm> (accessed 11.08.2021). – Text: electronic.
 9. P'yankov S.V., Kalinin V.G. Metod vychisleniya lineynykh razmerov rastra i porogovogo znacheniya summ napravleniy stoka pri postroenii gidrologicheskikh korrektnykh TsMR [A method for calculating the linear dimensions of the raster and the threshold value of the sums of the flow directions when constructing hydrologically correct DEM]. *Geograficheskij vestnik*, 2017, no. 1 (40), pp. 138–145. (In Russ.) DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-138-145.
 10. *Spravochnik po klimatu SSSR, Vyp. 9. Solnechnaya radiatsiya, radiatsionnyy balans i solnechnoe siyanie* [Handbook of the USSR Climate, Issue 9. Solar radiation, radiation balance and sunshine]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. 69 p. (In Russ.)
 11. Syutkin V.V. Modelirovanie insolyatsii zemnoy poverkhnosti v srede ARCGIS [Modeling of the Earth's surface insolation in the ARCG environment]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7, Geologiya. Geografiya*, 2011, no. 4, pp. 126–134. (In Russ.)
 12. Dubayah R., Rich P.M. GIS and Environmental Modeling: GIS-based solar radiation modeling. *Progress and Research Issues. GIS World Books*, 1996, pp. 129–134.
 13. Dubayah R., Rich P.M. Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9, pp. 405–419.
- Conflict of interests:** The author declares no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 11.08.2021

Accepted: 03.03.2022

Шайдулина Аделия Александровна
старший преподаватель кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь. Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-2439-908X, e-mail: adelinash89@mail.ru

Adeliya A. Shaydulina
Senior Lecturer at the Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-2439-908X, e-mail: adelinash89@mail.ru