

МЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.521.1 + 551.584

С.В. Исаков, В.А. Шкляев**ОЦЕНКА ПОСТУПЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: shklyayev@psu.ru

Рассматриваются теоретические основы расчетных методик по оценке притока прямой солнечной радиации на естественные поверхности различной пространственной ориентацией. Учитывались следующие факторы: высота солнца, уклон местности и ориентация склона. Использование геоинформационной среды позволяет эффективно и с большой детализацией осуществлять пространственный анализ территории для оценки солнечного энергетического потенциала. Проведенные исследования позволяют планировать наиболее рациональное освоение территорий.

Ключевые слова: микроклимат; солнечная радиация; освещение наклонных поверхностей; геоинформационные системы.

Процессы погодообразования и климат на планете определяются, прежде всего, потоком солнечного излучения в атмосфере. Часть этого излучения доходит до поверхности Земли и нагревает ее, вторая часть поглощается атмосферой и нагревает последнюю, третья часть отражается атмосферой и уходит в космическое пространство. Нагретая поверхность Земли излучает тепло, которое проходит через атмосферу, частично поглощаясь и рассеиваясь в ней. В свою очередь атмосфера излучает поглощенное ею тепло от Солнца и Земли по всем направлениям. Все эти процессы обуславливают, в конце концов, тепловой баланс планеты и, следовательно, ее климат [4]. Таким образом, радиационный баланс является одним из основных климатообразующих факторов. Он формирует и определяет естественный теплооборот, глубину сезонных изменений температуры воздуха и почвы, скорость испарения и ряд других важных эколого-климатических характеристик местности. В свою очередь, прямая солнечная радиация имеет основное значение в радиационном балансе горизонтальной поверхности. Такое положение сохраняется для наклонных поверхностей и должно учитываться при ориентации гелиотехники. Изучению прихода прямой радиации на поверхности различных ориентации посвящено много работ. Вопрос о приходе прямой радиации на наклонные поверхности достаточно полно был освещен в монографиях К.Я. Кондратьева, в работах И.А. Гольцберга и М.А. Гольцберга, Н.В. Кобышевой и др. [2, 3, 6-10, 13].

Детальное рассмотрение указанных выше процессов выявляет их сложнейшую зависимость от значительного количества изменяющихся в пространстве и во времени условий и параметров. И атмосфера, и подстилающая поверхность представляют собой сложнейшие динамические системы. Многочисленные исследования, проведенные за последние десятилетия в различных научных центрах мира, показали, что подстилающая поверхность оказывает весьма сильное, а в отдельных случаях и определяющее влияние на гидродинамический режим атмосферы [1, 10, 12]. Причем такое влияние осуществляется как на региональном, так и на глобальном, т.е. климатическом, уровне. Под подстилающей поверхностью подразумевается слой растительности и верхний слой почвы.

Для решения разнообразных задач, связанных с сельскохозяйственным производством, строительным проектированием, гелиотехникой, необходимо, прежде всего, иметь данные о радиационном режиме различно ориентированных наклонных поверхностей. Исследования радиационного режима наклонных поверхностей показали, что составляющие их радиационного баланса практически удобно определять через величины радиационного баланса горизонтальной поверхности, используя соответствующие расчетные методики или эмпирические связи. Такой подход важен потому, что радиационный режим горизонтальной поверхности изучен в настоящее время достаточно подробно для многих районов земного шара.

С развитием мировой актинометрической сети и спутниковых радиационных измерений появилась возможность исследования радиационного режима горизонтальной поверхности почти во всех частях земного шара.

Используя эти данные и располагая методиками перехода от величин радиационного баланса и его составляющих для горизонтальной поверхности к соответствующим значениям, характеризующим радиационный режим наклонных поверхностей, можно иметь всю необходимую информацию для оценки возможностей использования солнечной радиации с точки зрения условий окружающей среды. [9]

В настоящее время современные геоинформационные системы являются стандартом в картографии и различных аналитических работах в области пространственного анализа, поэтому реализация обозначенной методики картирования прихода солнечной радиации на наклонные поверхности с использованием ГИС представляет значительный интерес. К тому же некоторые операции сложного пространственного анализа в ГИС (например, одновременный анализ нескольких карт, объединение, вычитание объектов слоев карты, зональная геостатистика на основе цифровой модели рельефа, «алгебра» растровых карт и т.п.) облегчают процесс картирования и анализа информации и вообще невозможны с применением традиционных методов «бумажной» картографии [11].

Материал и методика исследования

Поступление солнечной радиации на местность и здания зависит от географической широты и времени года. Облучение зданий солнечными лучами зависит также от их ориентации относительно стран света. По-разному ориентированные склоны различно нагреваются. Таким образом, при оценке количества поступающей солнечной радиации на участок местности необходимо учитывать как крутизну, так и экспозицию рассматриваемой территории [9].

Прямая радиация на склон может быть определена по формулам, учитывающим астрономические факторы, а также крутизну и ориентацию склона (рис.1).

$$S_{скл} = S \cos i, \quad (1)$$

где S – прямая радиация на перпендикулярную к лучам поверхность; $\cos i$ – косинус угла падения солнечных лучей на заданную поверхность, определяемый соотношением

$$\cos i = \cos \alpha \sin h_{\odot} + \sin \alpha \cos h_{\odot} \cos \psi, \quad (2)$$

α – крутизна склона, i – угол падения солнечных лучей на склон, h_{\odot} – высота Солнца, ψ – разность азимутов Солнца и проекции нормали к склону.

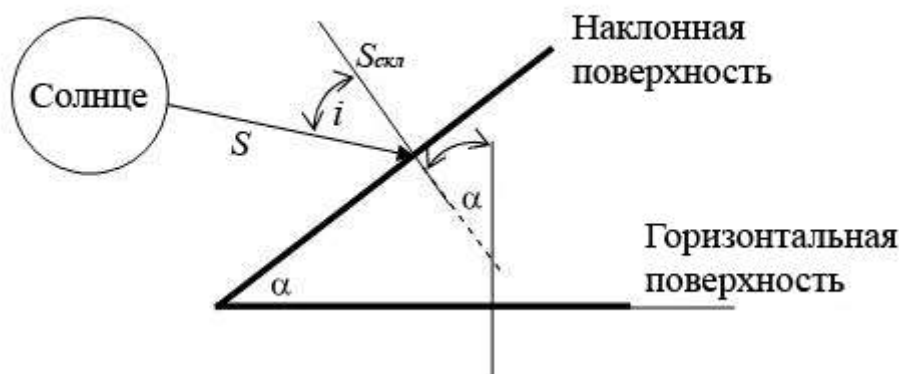


Рис. 1. Поступление прямой солнечной радиации на наклонную поверхность

Высота солнца h_{\odot} по истинному времени определяется так

$$\sin h_{\odot} = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau, \quad (3)$$

где φ – широта, δ – склонение солнца для данного дня (его диапазон приблизительно $-23,45^{\circ} \leq \delta \leq 23,45^{\circ}$), τ – часовой угол солнца, отсчитываемый от момента истинного полудня.

В свою очередь азимуты солнца определяются следующими соотношениями:

$$\cos \psi_{\Theta} = \frac{\sin h_{\Theta} \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h_{\Theta} \cos \varphi}, \quad (4)$$

$$\sin \psi_{\Theta} = \frac{\cos \delta \sin \tau}{\cos h_{\Theta}}. \quad (5)$$

Соотношения (2)-(5) можно подставить в формулу (1), которая будет отражать в общем виде зависимость прихода радиации к склону от его ориентации, определяемой углами α и ψ для любой широты φ и в различные моменты времени дня (часовой угол τ) или года (склонение Солнца δ).

Для практических задач особую значимость представляют не абсолютные значения прямой солнечной радиации, а относительные значения потоков и сумм прямой радиации по отношению к радиации горизонтальной поверхности. Такие относительные значения радиации называют коэффициентом для пересчета с горизонтальной поверхности на вертикальную K_v (или другую наклонную поверхность):

$$K_v = \frac{S_v}{S_H}. \quad (6)$$

Формула (6) представляет собой отношение потока прямой радиации на наклонную поверхность (S_v) к потоку на горизонтальную поверхность (S_H).

Относительная величина потока может быть вычислена по известным геометрическим соотношениям и записана в виде

$$K_v = \frac{\cos \psi}{\operatorname{tg} h_{\Theta}}. \quad (7)$$

Таким образом, имея данные о потоках прямой радиации, поступающей на горизонтальную поверхность S_H , и определив азимут и высоту солнца, можно найти значение потока радиации на вертикальную поверхность любой ориентации [9, 14].

Существенно упрощает этот способ то обстоятельство, что относительное значение радиации намного меньше зависит от облачности и прозрачности атмосферы по сравнению с абсолютным. Таким образом, из факторов, влияющих на коэффициент K_v , остается в основном широта места [2].

Реализация задачи в геоинформационной среде. Исходными материалами могут служить спутниковые снимки крупного масштаба. В качестве основы глобального покрытия могут быть использованы снимки со спутника Landsat 7, обработанные компанией EarthSat в рамках проекта NASA по составлению мозаики всей поверхности суши Земли. Более детальные изображения – со спутников компаний DigitalGlobe и GeoEye.

В данной работе в качестве примера использования возможностей геоинформационных систем проведен геостатистический анализ территории микрорайона «Архирейка». В качестве базового слоя использовались спутниковые снимки от GeoEye, площадь рассматриваемой территории (выделена жирной черной границей в центре) составляет 0,84 км² (рис. 2). Для дальнейшего определения крутизны и экспозиции склонов требуется провести восстановление рельефа, что в свою очередь было произведено по координатной сетке с шагом в 500 м, с последующей интерполяцией высот методом сплайна [5].

Анализ формулы (2) указывает на необходимость учета следующих характеристики:

1. Время (период) года, для которого строятся карты (слагаемое $\sin h_{\Theta}$).

Прежде всего, стоит заметить, что первоочередное влияние на облучение территории коротковолновой солнечной радиацией оказывают параметры солнечного сияния. Так, в зависимости от времени года и суток максимумы для каждой территории наблюдаются в определенный период. Основными переменными параметрами, влияющими на облучение склонов, являются азимут Солнца и его высота.

В зависимости от времени года максимальные значения высоты солнца отмечаются 21 июня каждого года, минимальные – 22 декабря. А в зависимости от времени суток в максимум в полуденные часы, минимум – перед восходом и заходом Солнца.

Целесообразно при построении карт использовать периоды, равные по продолжительности временам года, – в это время наиболее сходны как синоптические условия (циркуляционные процессы и преобладающий режим облачности), так и параметры солнечного сияния.



Рис. 2. Территория микрорайона «Архирейка». Спутниковый снимок.

2. Экспозиция склонов (входит в слагаемое $\cos\psi$).

Вторым по значимости фактором, влияющим на облучение территории, является экспозиция склонов. Обозначенные максимумы прихода солнечного излучения, обусловленные параметрами солнечного сияния, становятся ограничивающими факторами, в пределах которых может отмечаться изменчивость притока радиации и влияние ориентации склонов. Так, очевидно, что на склоны с южной ориентацией будут фиксироваться максимальные значения приходящей солнечной радиации. В свою очередь минимальные значения будут отмечаться на северных склонах. Сравнение прихода радиации на западные и восточные склоны, как отмечается в работе [2, 3], показывает практически равные значения до определенной крутизны склона.

Все рассуждения справедливы при одном допущении – отсутствии облачности.

На данном этапе работы создается карта экспозиции склонов для конкретной территории средствами модуля Spatial Analyst программного комплекса ArcGIS, на основе ранее созданных гипсометрических карт.

Так как ArcGIS позволяет переклассифицировать расчетные данные в любой необходимой градации (изначально данные по экспозиции представлены по 8 сторонам света), для оптимального результата была выбрана классификация экспозиции склонов по 4 сторонам света. Данный подход обусловлен тем, что большинство имеющихся результатов исследований, и, соответственно, полученных эмпирических коэффициентов, выполнены именно для такой градации [3]. К тому же излишнее дробление градации (8, 16 румбов) приводит к появлению нежелательной информационной нагрузки и может быть рекомендовано только для узкоспециализированных задач. Пример экспозиции склонов участка территории исследований приведен на рис. 3.

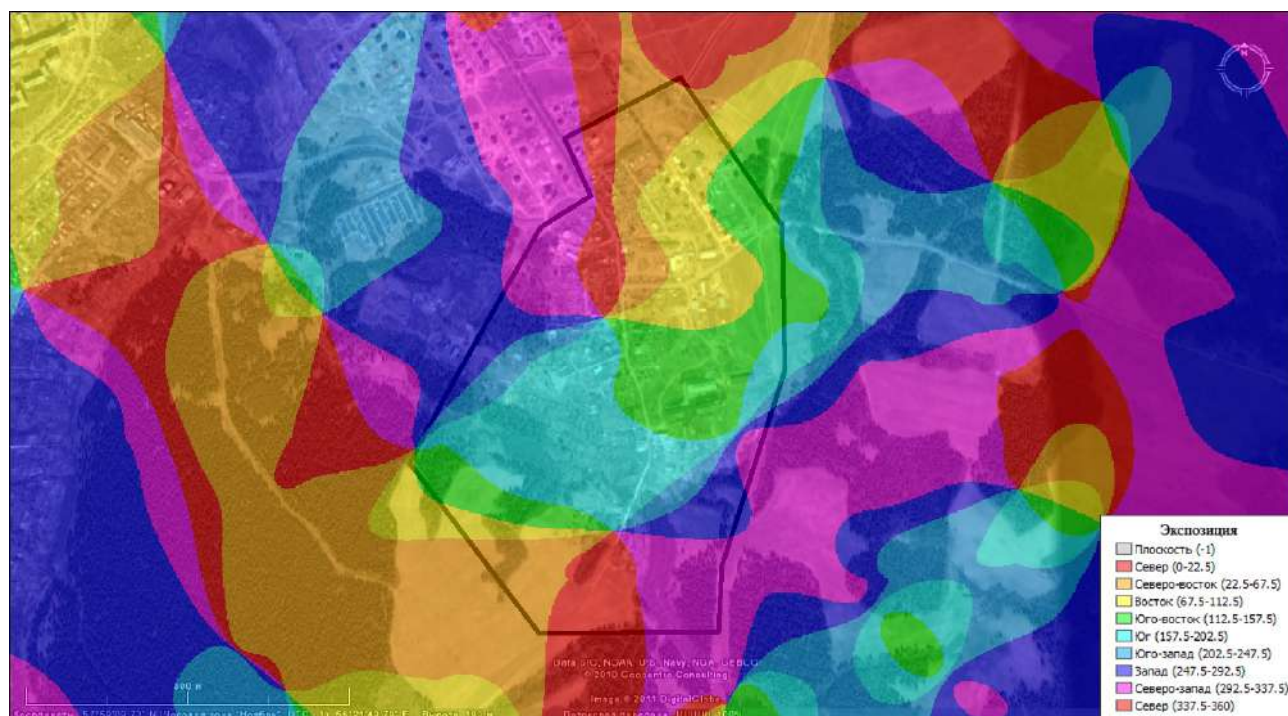


Рис. 3. Экспозиция склонов

3. Крутизна склонов (слагаемые $\cos \alpha$ и $\sin \alpha$).

Третьим из влияющих факторов является крутизна склонов. Влияние данного фактора находится для каждого из склонов в разных пределах. Наибольшую значимость крутизна склонов имеет для склонов южной и северной экспозиций. Так, увеличение крутизны склонов приводит к уменьшению поступающей солнечной радиации на северные склоны и увеличению на южные. Стоит также отметить, что, при прочих равных условиях, уменьшение притока радиации на северных склонах будет несколько больше, чем ее увеличение на южных [3].

Исследование зависимости максимальных значений притока солнечной радиации к южным склонам для конкретных условий территории имеет прикладное значение для гелиоэнергетики.

Построение карт крутизны склонов также выполняется с помощью модуля Spatial Analyst программного комплекса ArcGIS на основе ранее созданных гипсометрических карт (рис. 4).

На основе созданной карты требуется выделить ровные участки местности. В разных источниках предлагаются разные диапазоны для определения ровных участков – 0° - 1° либо 0° - 2° . В рамках данной работы был выбран последний диапазон значений, в соответствии с источником [3].

Результаты и их обсуждение

Заключительный этап предполагает проведение расчетным методом оценки микроклиматических условий климата на примере учета притока солнечной радиации в зависимости от особенностей подстилающей поверхности.

Для придания более универсального характера полученным картам целесообразно использовать не абсолютные значения притока солнечной радиации, а относительные. Так как на абсолютные значения существенное значение оказывают различные условия прозрачности и облачности на разных территориях, а относительные значения, как указано в работе [9], имеют более устойчивый характер.

Поскольку изменения радиации определяются экспозицией и крутизной склона, для построения карты прямой радиации в условиях изрезанного рельефа также следует совместить карты уклонов местности и карты экспозиций склонов. Количественные данные по изменению прихода прямой солнечной радиации в зависимости от местоположения были использованы в соответствии с результатами многолетних наблюдений при подготовке методических указаний по производству микроклиматических обследований в период изысканий [3].

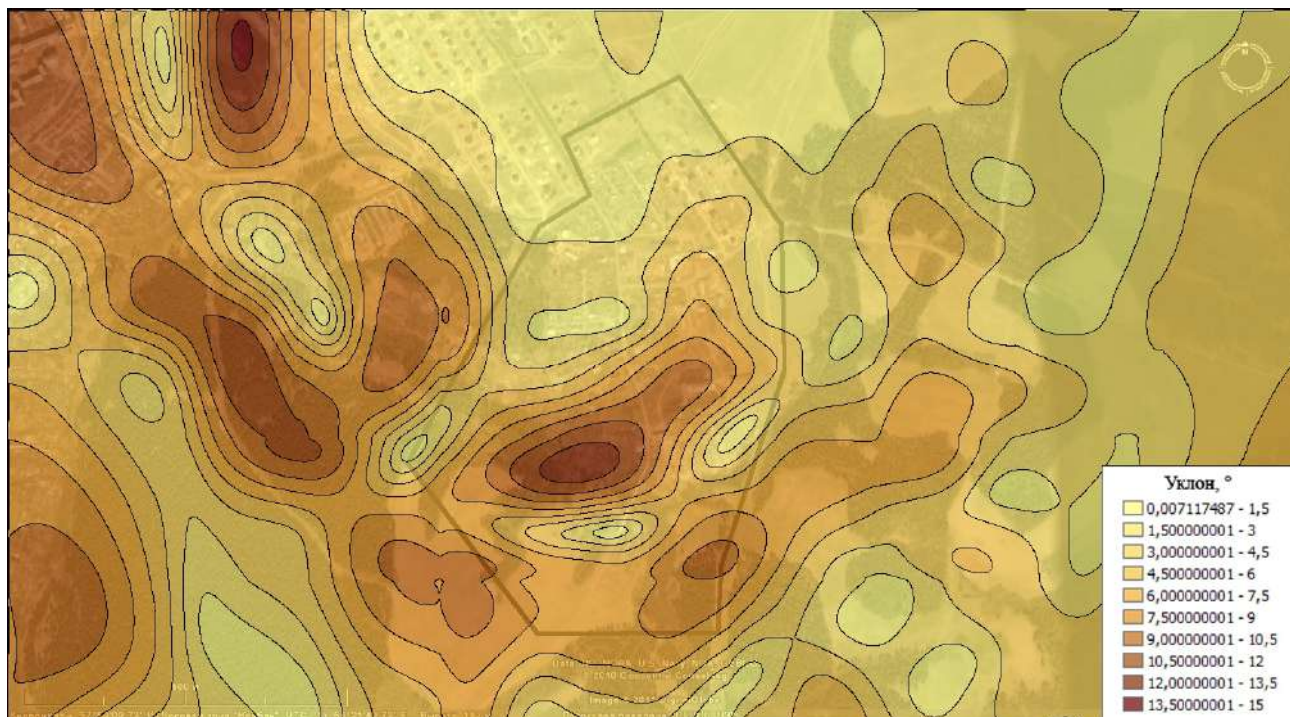


Рис. 4. Крутизна склонов

На результирующей карте проводится ранжирование территорий согласно рекомендациям [3] – выделяются шесть градаций прихода солнечной радиации в процентах от радиации на ровном месте (рис. 5).

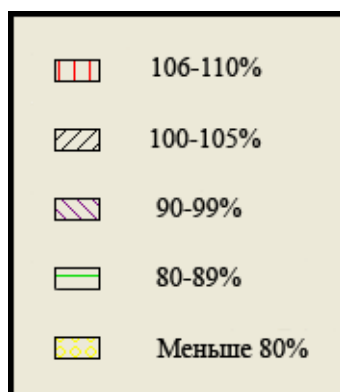


Рис. 5. Градации изменения прямой радиации (в процентах от радиации на ровном месте)

Таким образом, имея данные ближайшей метеостанции о средних суммах прямой радиации на горизонтальную поверхность, можно получить сумму радиации на отдельных участках рельефа путем умножения ее на соответствующий коэффициент либо использовать процентное соотношение прямой радиации на наклонную поверхность относительно горизонтальной (рис. 6). Но также можно ограничиться и относительными величинами радиации.

Использование результатов проведенной работы предполагает проведение комплексного пространственного анализа с целью оценки микроклиматических особенностей территории – пространственных характеристик подстилающей поверхности и элементов радиационного режима.

Извлечение необходимых данных для какой-либо конкретной территории из общего растрового слоя целесообразно выполнять с использованием выделенного слоя маски территории.

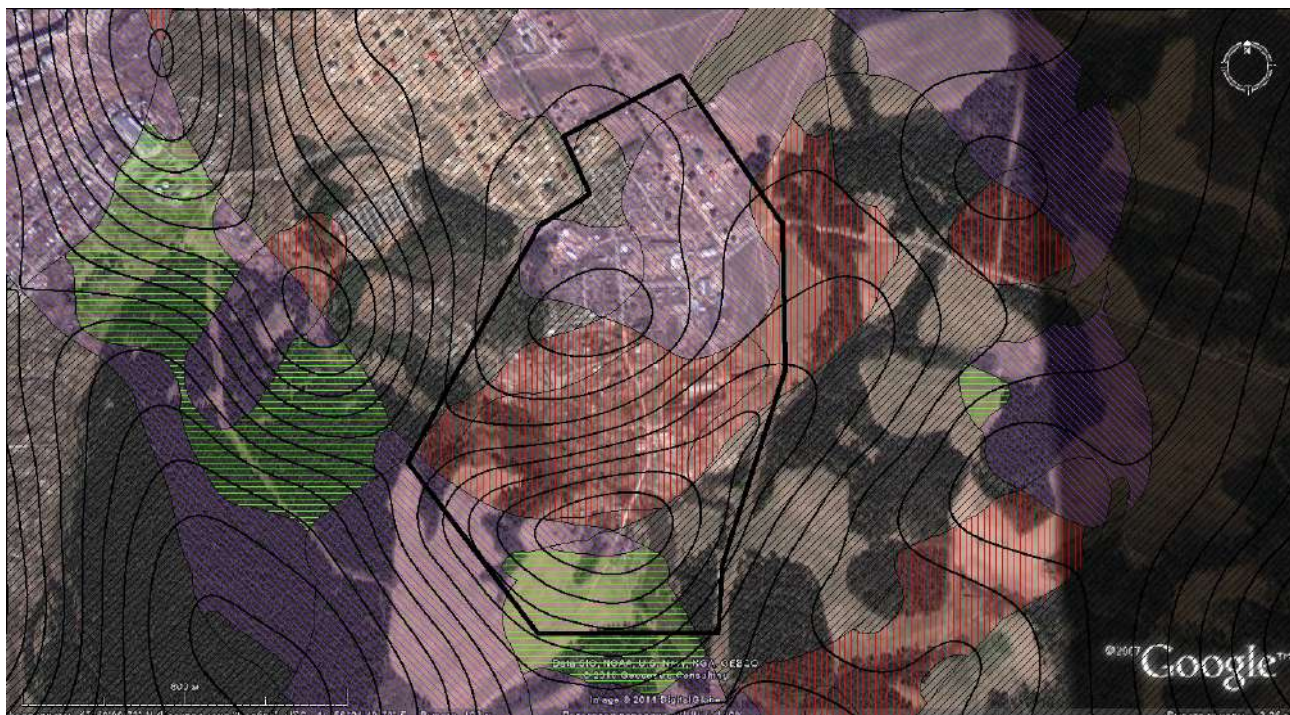


Рис. 6. Карта изменения прямой солнечной радиации (в процентах от радиации на ровном месте) для МС Пермь-Опытная

Анализ статистики высот показывает, что более половины территории расположено на высоте выше 150 м (табл. 1). Отмечаемые перепады высот свидетельствуют о неоднородности подстилающей поверхности, наличии таких типов рельефа, как ложбина и возвышенность, что хорошо видно на спутниковом снимке с изолиниями высот. Возвышенность расположена в северной части микрорайона. Существенное сгущение изогипс в центральной части свидетельствует о значительных величинах уклона местности (табл. 2).

Таблица 1

Диапазоны высот исследуемой территории (процентное соотношение)

Высоты, м	Микрорайон «Архирейка»
130 - 140	6 %
140 - 150	26 %
150 - 160	22 %
160 - 170	46 %

Таблица 2

Пространственная статистика величины уклона местности (процентное соотношение)

Уклон, °	Микрорайон «Архирейка»
0 - 1,5	15 %
1,5 - 3	18 %
3,0 - 4,5	13 %
4,5 - 6	12 %
6,0 - 7,5	17 %
7,5 - 9	13 %
9,0 - 10,5	7 %
10,5 - 12	3 %
12,0 - 13,5	2 %

Из табл. 2 видно, что примерно 90 % массива микрорайона «Архирейка» расположено на территории с уклоном до 10°. Ровная поверхность (до 2° уклона) соответствует примерно пятой части территории. Как и было отмечено, максимальный уклон отмечается в центральной части территории, где наблюдается смена форм рельефа «холм–ложбина». В целом, данное распределение уклонов местности будет способствовать определенному перераспределению поступающей к поверхности солнечной радиации.

Как было отмечено, экспозиция склонов играет существенную роль в нагревании поверхности за счет поступающей солнечной радиации. Разнообразие экспозиции склонов исследуемой территории приводит к значительным вариациям освещенности, которые достаточно эффективно могут быть оценены с помощью геоинформационных систем. На исследуемой территории преобладали склоны южной ориентации (табл. 3).

Практически четверть территории занимает северный склон. Таким образом, суммарная площадь южных и северных склонов составляет 73 %. Преобладание противоположных экспозиций свидетельствует о том, что данная территория имеет сложную орографию, которая приводит к изменению соотношения поступления солнечной радиации, в сравнении с ровной поверхностью (табл. 4).

Таблица 3

Пространственная статистика по экспозиции склонов местности (процентное соотношение)

Экспозиция	Микрорайон «Архирейка»
Северный склон	23 %
Восточный склон	16 %
Южный склон	50 %
Западный склон	12 %

Таблица 4

Пространственная статистика относительного притока прямой солнечной радиации (процентное соотношение)

Прямая солнечная радиация	Микрорайон «Архирейка»
Меньше 80 %	–
80-89 %	13 %
90-99 %	29 %
100-105 %	17 %
106-110 %	41 %
Среднее количество прямой радиации	98,0 %

Анализ целевого слоя картирования показывает, что наблюдается существенное изменение пространственных характеристик поступления прямой солнечной радиации на склоны. Так, южный склон возвышенности обуславливает увеличение суточного притока радиации до 10 %, в то время как южный склон ложбины (север микрорайона) приводит к уменьшению притока до 20 %. Западные и восточные склоны ложбины практически не отличаются по количеству приходящей радиации в сравнении с ровной поверхностью. Следует отметить, что среднее значение суточного притока составляет 98%, что соответствует притоку к ровной поверхности. Это свидетельствует о том, что осреднение характеристик территории приводит к потере значимой информации в пределах малых площадей местности. Следовательно, особенности микроклимата нейтрализуются, что в конечном счете приводит к значительным ошибкам в оценке локальных условий местности для дальнейших практических изысканий.

Таким образом, использование геоинформационных систем в качестве средства пространственной оценки структуры территории является эффективным инструментом, позволяющим определить изменения потоков солнечной радиации на наклонные поверхности.

Исследуемая территория имеет ряд особенностей:

- Микрорайон «Архирейка» находится на территории со склонами различной ориентации.
- Наблюдаются две формы рельефа – ложбина в центральной части и возвышенность в северной.
- Ровная поверхность – менее 20 % территории.
- Преобладают склоны с южной экспозицией, с увеличенным притоком к ним прямой солнечной радиации.
- Осреднение пространственного распределения притока солнечной радиации приводит к потере микроклиматической информации.

Таким образом, естественные наклонные поверхности, образованные возвышенностью и ложбиной, хорошо иллюстрируют пространственное перераспределение притока прямой солнечной радиации.

Библиографический список

1. Братсерт У.К. Испарение в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 352 с.
2. Гольберг М.А. Особенности возможного и действительного прихода прямой радиации к склонам и стенам в Белоруссии // Научные сообщения. Вильнюс: Ин-т геол. и геогр. АН ЛитССР, 1962. Т. 13. С. 369-378.
3. Гольцберг И.А. Методические указания по производству микроклиматических обследований в период изысканий. Л.: Гидрометиздат, 1969. 63 с.
4. Зуев В.Е., Тутов Г.А. Оптика атмосферы и климат. Томск: Изд-во «Спектр» института оптики атмосферы СО РАН, 1996. 271 с.
5. Исаков С.В., Шкляев В.А. Применение ГИС технологий при производстве микроклиматических исследований // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края: сб. науч. тр. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2010. С. 115-120.
6. Кобышева Н.В., Акимов Е.М., Ильина О.Б. [и др.] Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 320 с.
7. Кондратьев К.Я. Актинометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 690 с.
8. Кондратьев К.Я. Лучистая энергия Солнца / под ред. проф. П.Н. Тверского. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 600 с.
9. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный режим наклонных поверхностей. Л.: Гидрометиздат, 1978. 170 с.
10. Крапивин В.Ф., Свирежнев Ю.М., Тарко А.М. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. М.: Наука, 1982. 268 с.
11. Хромых В.В., Хромых О.В. Цифровые модели рельефа. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2007. 176 с.
12. Gates D.M. Biophysical ecology. N.Y.: Springer-Verlag, 1980. 611 p.
13. Kondratyev K.Ya. Radiation in the atmosphere. N.Y.: Academic Press, 1969. 912 p.
14. Sen Z. Solar energy fundamentals and modeling techniques. London: Springer, 2008. 276 p.

S.V. Isakov, V.A. Shklyayev

ESTIMATION OF RECEIPT OF SOLAR RADIATION ON NATURAL SURFACES WITH APPLICATION OF GEOINFORMATION SYSTEMS

Theoretical bases of settlement techniques according to inflow of direct solar radiation on natural surfaces are considered by various spatial orientation. Following factors were considered: height of the sun, a bias of district and orientation of a slope. Use of the geoinformation systems allows effectively and with the big detailed elaboration to carry out the spatial analysis of territory for an estimation of an energy potential of a solar energy. Carried out researches will allow to plan the most rational development of territories.

Key words: a microclimate; solar radiation; illumination of inclined surfaces; geoinformation systems.