

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Вылиток Наталья Александровна

**Влияние закрытости горизонта на радиационный баланс
пересеченной местности**

Магистерская диссертация

«К ЗАЩИТЕ»

Научный руководитель
д.г.н., проф. Русин И.Н.

« _____ » _____ 2016

Заведующий кафедрой
Климатологии и мониторинга
окружающей среды
к.г.н., доц. Священников П.Н.

« _____ » _____ 2016

Санкт-Петербург
2016

Оглавление

| | |
|---------------|----|
| | 3 |
| 1. « | 6 |
|» | 6 |
| 2. | 10 |
| 2.1 | 10 |
| 2.2 | 12 |
| 3. | 13 |
| 3.1 | 13 |
| 3.2 | 14 |
| 3.2.1 | 15 |
| 3.2.2 | 16 |
| 3.3 | 19 |
| 3.4 | 25 |
| 4. | 30 |
| 4.1 | 31 |
| 4.2 | 37 |
| 4.2.1 | 37 |
| 4.2.2 | 41 |
| 4.2.3 (..... | 51 |
| 5. | 63 |
| | 65 |
| | 66 |
| 1. - | 69 |

Введение

Одной из важнейших составляющих микроклимата является радиационный баланс. Его измерение или расчет требует оценок прямой и рассеянной солнечной радиации, а также эффективного длинноволнового излучения, состоящего из излучения земной поверхности и противоизлучения атмосферы. При этом необходимо учитывать, что на микромасштабном уровне одним из основных факторов, определяющих значения данных характеристик, является рельеф местности, который способен значительно перераспределять потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, создавая затенение, закрытость горизонта, а также вторичное отражение от склонов. На равнинной местности влиянием окружающей топографии на составляющие радиационного баланса в интересующей точке можно пренебречь, но с возрастанием расчлененности рельефа становится необходимым вводить различные поправки при расчетах потоков излучения на конкретной территории.

Методика и некоторые результаты расчета влияния затенения на поток прямой солнечной радиации, поступающей в заданную точку, рассматривались ранее, например, в работе (Русин И.Н., Пикалева А.А., 2012). Расчет потоков солнечной радиации и эффективного излучения на одиночный склон также рассматривались многими авторами (например, Кондратьев К.Я., Подольская Э.Л., 1953).

Настоящая работа посвящена оценке влияния закрытости горизонта на радиационный баланс пересеченной местности.

В общем случае потоки рассеянной коротковолновой радиации и эффективного излучения рассматриваются как приходящие ото всей небесной полусферы. Однако, например, расположенная рядом с изучаемой точкой гора будет закрывать часть полусферы, тем самым уменьшая радиационные потоки.

Учитывать влияние закрытости горизонта важно для оценки радиационного баланса не только горных районов, но и городов. Большое количество построек резко меняют естественные условия распределения радиационных потоков, в результате чего создаются местные особенности радиационного баланса и изменение скоростей ночного выхолаживания, когда длинноволновая радиация, вместо того, чтобы испускаться в атмосферу, попадает в ловушку между теплыми поверхностями. Такое уменьшение длинноволновой радиации непосредственно зависит от закрытости

горизонта и считается главным фактором формирования городского острова тепла (Oke T.R., 1987).

Количественной мерой закрытости горизонта принято считать функцию закрытости горизонта. Эта функция показывает долю небесной полусферы, которая наблюдается из определенной точки местности с учетом окружающей топографии. Кроме того, ее определяют, как отношение радиации, полученной (или излученной) горизонтальной поверхностью от неба, к радиации, излученной (или полученной) всей небесной полусферой (Watson I.D., Johnson G.T., 1987).

Функция закрытости горизонта широко используется климатологами для исследования зависимости между интенсивностью городского острова тепла и геометрией городского пространства (T. R. Oke, 1981; Barring L. и др. 1985; Unger J., 2009).

В городских условиях исследование функции закрытости горизонта упрощается наличием подробных планов улиц, довольно простой геометрией зданий и значительно большими, чем в горах, возможностями прямых измерений. В городах для оценки функции закрытости все более широко применяется метод специальной фотографии (Holmer B., 1992).

Существуют работы, в которых функция закрытости горизонта рассматривается, как один из важных климатообразующих факторов в лесных массивах, где влияние геометрических характеристик пространства также оказывается велико (Holmer B. и др., 2001).

Актуальность решения задач микроклиматологии, в том числе и вопросов, касающихся радиационного баланса, определяется необходимостью детализации пространственного разрешения результатов численного моделирования атмосферных процессов для того, чтобы учитывать конкретные ландшафтные особенности местонахождения потребителей. При этом учет функции закрытости в расчетах радиационного баланса, и ее оценка по данным о рельефе местности является мало изученной и очень трудоемкой задачей.

Таким образом, функция закрытости горизонта играет ключевую роль в изучении микроклимата горных районов, городов, лесов и др., т.е. районов со сложной геометрией.

Наибольший вклад закрытость части небесной полусферы вносит в уменьшение продолжительности солнечного сияния (затенение), интенсивности рассеянной радиации и в изменение эффективного излучения.

Цель данной работы состоит в том, чтобы выявить закономерности влияния функции закрытости на радиационный баланс пересеченной местности.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) разработать модели различных типов пересеченной местности;
- 2) произвести расчет значений функции закрытости для разработанных моделей;
- 3) произвести расчет значений радиационного баланса с учетом функции закрытости;
- 4) сравнить радиационный баланс по площади пересеченной и равнинной местности;
- 5) сравнить влияние затенения и функции закрытости горизонта на значения радиационного баланса;
- 6) исследовать зависимость составляющих радиационного баланса от характеристик рельефа (закрытости, угла наклона).

Глава 1. Обзор работ по теме «Влияние закрытости горизонта на радиационный баланс пересеченной местности»

Изучение влияния закрытости горизонта на радиационный баланс началось сравнительно недавно. В 1965 году в работе (Reifsnyder, Lull, 1965) авторы ввели в рассмотрение так называемый фактор видимости. Данная величина определяется, как часть радиации, излученной некоторой поверхностью во всех направлениях, которая была перехвачена некоторой другой поверхностью. Фактор видимости в данной работе используется для учета влияния перехвата солнечной радиации деревьями в лесных массивах. Для его определения выводится зависимость от радиуса открытой местности и высоты окружающих деревьев.

В 1979 году J. Dozier и S.I. Outcalt в работе (J. Dozier и Sam I. Outcalt, 1979) используют фактор видимости при моделировании радиационного баланса пересеченной местности. Определение значений самого фактора в данной работе производится через средний угол горизонта, рассчитанный в каждой точке цифровой модели рельефа.

В работе (D. Marks и J. Dozier, 1979) приводится модель проходящего длинноволнового излучения в горной местности, которая, по утверждению авторов, дает довольно точную оценку его изменчивости в условиях ясного неба. Учет влияния рельефа на длинноволновую радиацию производится также через фактор видимости, рассчитываемый через углы горизонта. Однако авторы утверждают, что обычно данный фактор имеет значения больше 0,9 и не оказывает существенного влияния на длинноволновое излучение.

Основной же проблемой определения фактора видимости является огромное количество необходимых расчетных операций. Поэтому получение его оценки с хорошей точностью требует больших вычислительных ресурсов.

В 1981 году в работе (J. Dozier и D. Bruno, 1981) приводится упрощенный алгоритм расчета, позволяющий сократить количество расчетов и при этом получить достаточно точное значение фактора видимости в каждом узле цифровой модели рельефа.

В том же году T.R. Oke в работе (Oke, T.R., 1981) впервые показал важность данного фактора в формировании температурного режима внутри городских улиц. Автор использует термин фактор видимости неба, или функция закрытости (в русском языке), который определяет, как долю небесной полусферы, видимой из определенной точки местности. Геометрия городских улиц, а именно, перекрывание постройками

части небесной полусферы, рассматривается в данной статье как основной фактор формирования городского острова тепла.

Из-за достаточно простой геометрии в городских условиях рассчитать значения функции закрытости в некоторой точке местности несколько проще, чем сделать это в горных районах или лесных массивах. Для решения данной задачи стало появляться большое количество различных техник и методов.

В 1986 году в работе (Steyn D.G. и др., 1986) была предложена техника определения закрытости с помощью фотоаппарата со сверхширокоугольным объективом типа «рыбий глаз». Для этого в точке, где необходимо рассчитать значения закрытости устанавливается данная фотокамера, полученное с ее помощью изображение анализируется, отделяются пиксели, соответствующие областям открытого неба, и считается отношение их количества к общему количеству пикселей.

В дальнейшем было издано достаточно много работ, посвященных методам и способам отделения пикселей открытого неба от пикселей закрытых участков (например, В. Holmer и др., 1999; C.S.B. Grimmond и др., 2001; L. Chapman и J. E. Thornes, 2003).

За последние 15 лет исследования закрытости и ее влияния на микроклимат с помощью сверхширокоугольного объектива были проведены во многих городах. Обычно такие исследования проводились совместно с локальными непродолжительными метеорологическими наблюдениями в точках установки фотокамеры и были направлены на выявление зависимостей температуры воздуха, подстилающей поверхности и коротковолновой радиации от закрытости.

Так, например, в работе (Marie K Svensson, 2004) представлены исследования зависимости температуры воздуха от закрытости горизонта в городе Гётеборг, Швеция. Авторы показывают, что во многом результаты исследования определяются способом установки фотокамеры (на уровне земной поверхности или на уровне метеорологических наблюдений (2 м)), и достаточно сильную зависимость (коэффициент детерминации $R^2=0.39-0.78$) можно получить при установке на уровне земной поверхности.

Кроме того, похожие исследования представлены в (Giridharan R. и др., 2004; F. Bourbia, F. Boucheriba, 2008; A. Noori Kakon, M. Nobuo, 2009; Xiaodong He и др., 2015; M. Scarano & J.A. Sobrino, 2015 и др.)

В работах (Johnson and Watson 1984, Watson and Johnson, 1987) был предложен аналитический метод определения закрытости в городских условиях. Для решения

задачи авторы создали номограмму, позволяющую вычислять значения закрытости, зная высоту препятствия и его азимут.

Большинство методов, применимых в городских условиях, предполагает определение закрытости независимо в каждой точке. Отдельную проблему представляет определение ее по некоторой достаточно большой площади, например, внутри городского квартала или целого города. В 2001 году авторы статьи (Bradley et al. 2001) предложили решение на основе классификации городских ландшафтов по типу закрытости, что открыло возможности для более детальной оценки закрытости для использования в климатических моделях.

В 2002 году (Chapman et al., 2002) была опубликована методика вычисления закрытости, используя GPS-приемники для получения данных о видимости спутников. Число проходящих спутников, число видимых спутников и отношение сигнала к шуму использовались для разработки уравнения множественной регрессии и определения на его основе закрытости участка местности. Такой метод также дал достаточно хорошие результаты в городских районах, однако за их пределами деревья создают шум и очень изменчивые данные на небольших расстояниях, что приводит к резкому возрастанию ошибки регрессии.

По мере развития геоинформационных систем и нарастания вычислительных мощностей создавались методы, позволяющие вычислять закрытость на основе картографических данных или компьютерных моделей.

В 2003-2004 годах (Souza et al. 2003, 2004) была разработана надстройка 3DSkyView, работающая в среде ArcView GIS version 3.2, определяющая закрытость на основе плана городского района с известными высотами домов в виде атрибутивной таблицы. С помощью стереографической проекции определяется новая 3D система координат и производится вычисление закрытости в заданной точке путем наложения сферической сетки с таким же радиусом на стереографическую проекцию участка местности и сравнения площади неба и площади построек.

В 2009 в работе (Gal и др., 2009) авторы предложили определять закрытость с помощью упрощенной векторной модели города, где дома представлены в виде полигонов. Далее внутри такой модели выбирается полусфера с заданным радиусом и делится на некоторое количество равных частей, в зависимости от направления. В пределах каждого направления затем определяется здание с наибольшим углом горизонта. Закрытой частью неба далее считается часть сферы, ограниченная этим зданием. Точность такого метода зависит от радиуса и частоты разбиения сферы.

В 2015 году вышла статья (Carrasco-Hernandez и др., 2015), в которой описывается метод определения закрытости с помощью Google Street View. Панорамный обзор данного продукта позволяет, по мнению авторов, создать в любой точке изображение, аналогичное снимку сверхширокоугольным объективом и далее известными способами рассчитать закрытость.

Как видно, на данный момент существует достаточно много методов, позволяющих определять закрытость горизонта внутри городских кварталов, однако, решение той же задачи в горных регионах является гораздо более трудоемким и достаточно плохо изучено на данный момент.

В 2003 году для определения закрытости в статье (J. G. Corríprio, 2003) было предложено использовать один из алгоритмов расчета затенения. В качестве исходных данных для предложенного метода служит цифровая модель рельефа в виде растрового изображения и информация о расположении точечного источника света (высота и азимут Солнца). Точка расположения Солнца перемещается по всему небосводу во множество положений. Рассчитанные для каждого такого положения поля теней накапливаются и затем усредняются, чтобы в итоге получить поле функции закрытости.

В 2012 году вышла работа (Helbig, N., and H. Löwe, 2012), в которой предложен метод параметризации закрытости. Так как – закрытость оказывает сильное влияние на потоки солнечной радиации, ее необходимо учитывать в климатических моделях, однако такие модели, как правило, организуются на достаточно крупной вычислительной сетке, что не позволяет рассчитать закрытость напрямую. Поэтому авторы предложили уравнение для параметризации закрытости на основе данных о статистических характеристиках подсеточной топографии.

Из настоящего обзора видно, что за последнее десятилетие основное внимание уделялось изучению влияния закрытости на радиационный и температурный режимы городов. Для этого было создано множество различных методов. Закрытость же горных районов практически не изучалась, несмотря на важное ее значение в формировании радиационного баланса, а следовательно, климатического режима данных территорий.

Исследованию данного вопроса и посвящена настоящая работа.

Глава 2. Радиационный баланс пересеченной местности

Радиационный баланс представляет собой разность потоков приходящей солнечной радиации и эффективного излучения. В общем виде уравнение радиационного баланса можно представить следующим образом:

$$(1)$$

где R - радиационный баланс, S - прямая коротковолновая радиация, D - приходящая рассеянная коротковолновая радиация, alb - альbedo поверхности, E_s - излучение земной поверхности, E_a - противоизлучение атмосферы.

В условиях пересеченной местности под влиянием закрытости горизонта данные потоки сильно деформируются.

2.1 Определение функции закрытости

В общем случае при определении потоков рассеянной радиации и противоизлучения атмосферы мы подразумеваем, что радиация приходит в точку на земной поверхности ото всего небесного свода. Однако в реальных условиях часть его может быть закрыта окружающим рельефом, зданиями или древесной растительностью. Поэтому в рассмотрение вводится такое понятие, как функция закрытости горизонта, SVF (*Sky View Factor*). Она показывает, какая часть небесной полусферы, центр проекции которой на плоскость расположен в анализируемой точке, является видимой. Также ее определяют, как отношение радиации, полученной (или излученной) земной поверхностью от неба, к радиации, излученной (или полученной) всей небесной полусферой.

Выражение для нахождения значений функции закрытости можно получить указанным ниже способом. Излучение, падающее на горизонтальную площадку, зависит от высоты солнца (зенитного расстояния) по закону Ламберта:

$$(2)$$

где I - интенсивность светового потока, I_0 - солнечная постоянная, θ - зенитное расстояние. Предполагая, что освещает площадку элементарный телесный угол $d\Omega$, получаем формулу для потока солнечной радиации:

(3)

Причем интеграл должен быть получен по всей верхней полусфере.

Учитывая определение элементарного телесного угла в сферических координатах (рис.1)

(4)

получаем формулу для потока от полусферы в виде:

(5)

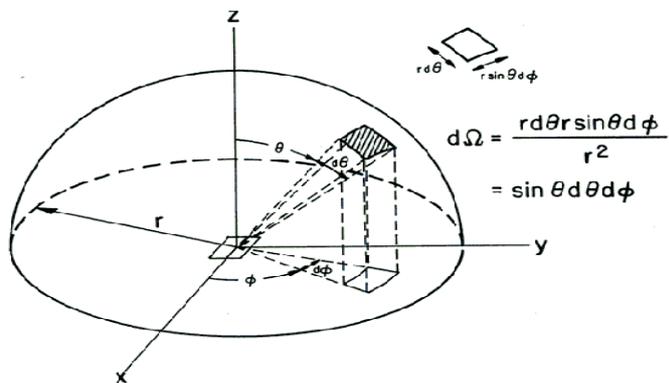


Рис.1. Определение телесного угла $d\Omega$ в сферической системе координат.

Если все точки неба имеют одинаковую интенсивность свечения (изотропная радиация) I , то ее можно вынести за знак интеграла. Дальнейшие преобразования приведены ниже.

Если видимой является вся небесная полусфера:

$$E = I\pi \tag{6}$$

В том случае, если горизонт закрыт на угол $\gamma(\varphi)$ формула для потока излучения немного изменяются:

(7)

Функция закрытости определяется как отношение потока (7) к потоку (6):

(8)

Путем замены квадрата косинуса другими тригонометрическими функциями по формулам тригонометрии могут быть получены различные модификации данного выражения.

Таким образом, видно, что функция закрытости горизонта представляет собой безразмерную характеристику с диапазоном значений от 0 до 1. Если указанная функция принимает значение, равное 1, видимой является вся небесная полусфера; если же она принимает значение, равное 0, все небо скрыто от наблюдателя.

2.2 Влияние функции закрытости на радиационный баланс

Различия значений функции закрытости горизонта будут определять различия между значениями радиационного баланса пересеченной и равнинной местности.

Радиационный баланс на полностью открытой территории ($SVF = 1$) можно представить в виде формулы (1).

В пересеченной местности ($SVF < 1$) радиационный баланс следует представлять иначе. Потоки радиации, приходящие от всей небесной полусферы D и E_a , уменьшаются пропорционально значению SVF . Поток прямой солнечной радиации тоже подвергается изменению, хотя его значения вычисляются с учетом затенения. Отраженная прямая, рассеянная солнечная радиация и длинноволновое излучение земли, по-прежнему, излучаются во все стороны, но появляются дополнительные потоки отраженной склонами коротковолновой радиации R_r и излученной склонами длинноволновой $E_{c\downarrow}$ радиации. Таким образом, радиационный баланс в точке пересеченной местности с учетом фактора закрытости будет описываться формулой:

(9)

Расчет составляющих радиационного баланса с учетом описанных изменений представлен далее в работе.

Глава 3. Метод расчета радиационного баланса пересеченной местности

В настоящей главе приводится описание методик расчета оставляющих радиационного баланса.

3.1 Расчет характеристик склона

В качестве исходных данных для расчета всех характеристик рельефа используется цифровая модель местности, представленная регулярной сеткой, привязанной к некоторой декартовой системе координат, с известными значениями высот в каждом узле.

Уравнение рассматриваемой земной поверхности $F(x,y,z)$ и вектор нормали к ней в данном случае можно выразить следующими формулами:

(10)

(11)

Здесь через h обозначена высота рельефа, через n — вектор нормали к этой поверхности. Остальные обозначения являются общепринятыми. Используя эти обозначения можно записать важные для расчета радиационного баланса наклонной поверхности характеристики.

Косинус угла наклона склона \geq , равный углу между вектором нормали к поверхности и вертикальной осью, направленной в зенит, определяется по формуле:

(12)

Азимут склона A , отсчитываемый от направления на юг и положительный к западу, можно определить по формуле:

(13)

Необходимые частные производные вычисляются по цифровой модели рельефа с использованием центрально-разностных формул.

3.2 Расчет значений функции закрытости

На практике получить значение функции закрытости горизонта оказывается нелегко, в отличие от азимута или угла наклона, для таких расчетов недостаточно данных лишь о ближайших соседних пунктах. Горизонт для какого-либо места может составлять любая точка прилегающего рельефа. Поэтому при вычислениях необходимо сравнивать каждую точку с каждой другой точкой. По этой причине такие расчеты становятся очень объемными и неудобными.

Методы определения закрытости, предложенные различными авторами, рассмотрены в главе 2. Здесь же более подробно будет рассмотрен метод Дозье-Бруно, который оказался наиболее подходящим для решения поставленных в настоящей работе задач.

В отличие от предыдущих методов данный алгоритм нацелен на определение не только функции закрытости, но и самих углов горизонта для каждой точки по всем направлениям, которые также удобно использовать для расчета затенения.

При этом в качестве входных данных необходимо иметь только цифровую модель рельефа.

Для некоторого упрощения авторы данного алгоритма ставят задачу так, чтобы определять не углы горизонта, а координаты точек, формирующих горизонт в данном направлении. Это позволяет работать не с каждой точкой в отдельности, а с рядами точек, что значительно сокращает объем вычислений. При этом в дальнейшем мы сможем определить необходимые нам углы с помощью цифровой модели рельефа.

Далее рассмотрим данный алгоритм подробнее.

3.2.1 Определение точек горизонта для отдельного профиля

Для начала рассмотрим способ нахождения координат точек горизонта для двумерного случая.

Выберем произвольный профиль на местности, вдоль которого имеется некоторое количество точек. Предполагается, что известны значения высоты $A(i)$ в каждой точке и значения расстояния $D(i)$ от некоторого начала отсчета до каждой точки ($D(i) > D(j)$ при $i > j$) (Рис. 2).

Для каждой точки нам необходимо определить номера тех пунктов, которые будут формировать горизонт для нее в прямом и обратном направлениях, обозначим их H_f и H_b соответственно.

Точка горизонта в прямом направлении H_f должна удовлетворять следующим условиям:

1. Для всех $0 \leq i < N$, $i \leq H_f(i) < N$ (следовательно, $H_f(N-1) = N-1$);

2. Для всех $0 \leq i < N$, если $A(i) \geq A(j)$ для всех $i < j < N$, тогда $H_f(i) = i$ (т.е. если высота точки больше или равна высоте любой другой точки в прямом направлении, она является своим собственным горизонтом)

3. Для всех $0 \leq i < N$, если k – наибольшее значение больше, чем i и меньше, чем N – такое, что $A(k) > A(i)$ и

$$A(j) \leq A(i) + [A(k) - A(i)]$$

для всех $i < j < N$, $j \neq k$, тогда $H_f(i) = k$ (т.е. если две точки в прямом направлении одинаково могут быть точками горизонта, то выбирается наиболее дальняя).

Аналогично, точка горизонта в обратном направлении $H_b(i)$ удовлетворяет следующим условиям:

1. Для всех $0 \leq i < N$, $0 \leq H_b(i) \leq i$ (следовательно, $H_b(0) = 0$);

2. Для всех $0 \leq i < N$, если $A(i) \geq A(j)$ для всех $0 \leq j < i$, тогда $H_b(i) = i$ (т.е. если высота точки больше или равна высоте другой точки в обратном направлении, она является своим собственным горизонтом)

3. Для всех $0 \leq i < N$, если k – наименьшее значение меньше, чем i и больше или равно 0, такое что $A(k) > A(i)$ и

$$A(j) \leq A(i) + [A(k) - A(0)]$$

для всех $0 \leq j < i$, $j \neq k$, тогда $H_b(i) = k$ (т.е. если две точки в обратном направлении одинаково могут быть точками горизонта, то выбирается наиболее дальняя).

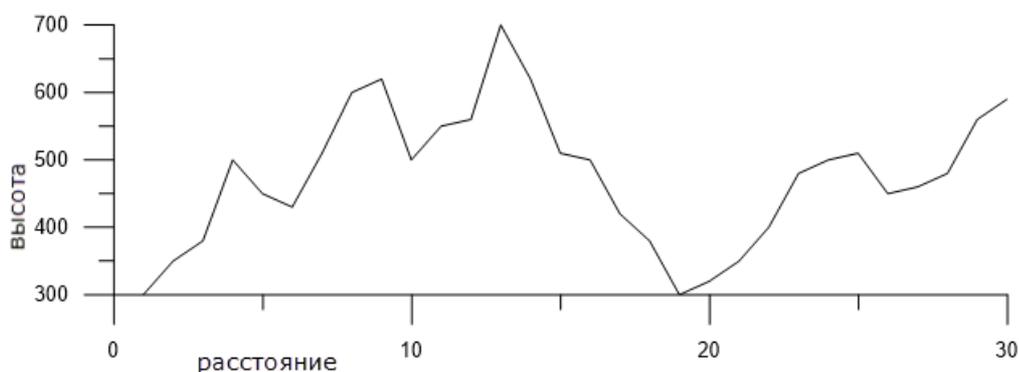


Рис.2. Пример двумерного профиля.

Далее вводится некоторая функция $slope(i, j)$ такая, что для $0 \leq i < N$ и $0 \leq j < N$

1) при $A(j) \leq A(i)$

2) при $A(j) > A(i)$

Т.е. если $A(j) > A(i)$, тогда $slope(i, j)$ определяется как тангенс острого угла, который прямая, проходящая через точки i и j , составляет с горизонтальной осью (отношение разности высот точек к расстоянию между ними).

Более эффективный алгоритм можно получить, если заметить, что когда j является горизонтом для точки i , если $slope(i, j) > slope(j, H_f(j))$, то все остальные точки перед j не нужно проверять, т.к. ясно, что они невидимы из точки i , и $H_f(i)=j$. Более того, если

$slope(i, j) < slope(j, H_f(j))$, то точки $i, j + 1 \dots H_f(j) - 1$ не могут быть точками горизонта для i при данных обстоятельствах. Наконец, если $slope(i, j) = slope(j, H_f(j))$, то $H_f(i)=H_f(j)$.

При организации данного алгоритма для всех пунктов мы получаем координаты точек горизонта в пределах профиля в прямом и обратном направлении. Однако такое решение является только промежуточным. Далее рассмотрим трехмерный случай.

3.2.2 Определение горизонта для всех точек области

Для практических целей описанные выше положения горизонта в каждой точке цифровой модели рельефа необходимо определять для всех направлений от 0 до 360°. Предложенный Дозье и Бруно способ решения заключается в том, чтобы группировать точки сетки, лежащие на прямых, направленных под заданным углом, а затем все эти точки обрабатывать так, как указано выше.

Сначала все точки привязываются к некоторой декартовой системе координат, начало которой $(0,0)$ должно быть расположено как можно ближе к середине сетки, так, чтобы координаты точек представляли собой целые значения, а интервалы между ними равны $\Delta x = \Delta y = 1$.

Таким образом, в начальном положении каждая точка оказывается лежащей на одном из профилей в зависимости от ее координаты x , что позволяет определять точки-горизонта на каждом профиле с помощью алгоритма для двумерного случая.

Далее, чтобы определить горизонт в другом направлении, сетка поворачивается относительно точки начала координат на угол α (против часовой стрелки) (Рис.3).

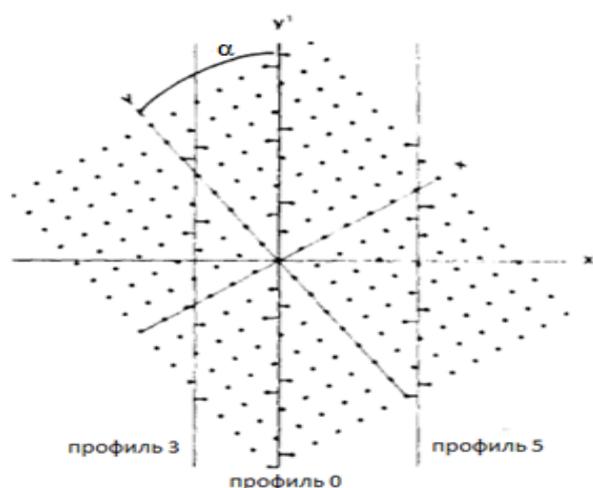


Рис.3. Поворот высотной сетки относительно профилей.

После поворота координаты точек относительно новой неподвижной системы координат (x',y') можно выразить с помощью следующих формул:

$$\begin{cases} x' = x \cos \alpha - y \sin \alpha \\ y' = x \sin \alpha + y \cos \alpha \end{cases} \quad (14)$$

где x, y – координаты точки до вращения; x', y' – координаты точки после поворота сетки на угол α .

Координата y' определяет расстояние до точки вдоль профиля от начала координат. Координата x' позволяет определить принадлежность точки к новым профилям по направлениям. Для этого авторы алгоритма (Dozier J., Bruno J., 1981) предложили округлять ее до целых значений $[x']$.

Такие профили мы можем построить для любого направления от 0 до 360° . Однако, т.к. для каждого профиля функцию горизонта мы можем получить как в прямом, так и в обратном направлении, то сетку необходимо поворачивать только в диапазоне от 0 до 180° .

Как показали эксперименты, такой метод сбора профиля иногда приводит к некоторым искажениям горизонта, поскольку в один профиль сводятся не лежащие точно на одной прямой высоты рельефа. Однако, как показали расчеты, на точность составляющих радиационного баланса в точке с учетом функции закрытости, такие искажения не оказывают существенного влияния.

Дискретность угла поворота $\Delta\alpha$, использованная в нашей работе, равна $\pi/32$. В результате пробных расчетов было выявлено, что такое количество направлений является оптимальным. Дальнейшее увеличение их числа не приводит к существенному изменению информативности результатов. Использование меньшего числа направлений также возможно, но дает менее полное описание изменчивости закрытости.

После реализации описанного выше алгоритма для всех точек сетки найдены высоты горизонта и расстояния до точек, которые его формируют. Теперь значения самой функции закрытости нетрудно рассчитать по формуле (8), используя численное интегрирование. Таким образом, видно, что количество операций, необходимых для решения данной задачи, значительно сокращается.

При программировании этого метода удобно от двумерной индексации узлов сетки перейти к одномерной по формуле:

$$(15)$$

где N – число узлов по оси абсцисс в исходной сетке. Все рассчитываемые величины удобно хранить как функции от индекса $k_{i,j}$. Тогда после получения массива координат точек после поворота $([x'(k_{i,j})], y'(k_{i,j}))$ по формулам (14) группировка точек по профилям одного направления осуществляется простой сортировкой по первичному признаку $[x'(k_{i,j})]$ и вторичному признаку $y'(k_{i,j})$.

На основе данного алгоритма была написана программа на языке *Visual Basic for Application*. Входными данными для нее служит цифровая модель рельефа в виде таблицы *Excel*. В качестве выходных данных получаем массив значений функции закрытости для каждой точки по 64-м направлениям, среднее значение функции закрытости в каждой точке и среднее значение закрытости по всему полю рельефа. Таким образом, результаты можно представить в виде круговой диаграммы – «розы закрытости» – в точке или поля закрытости для всей рассматриваемой площади (блок-схему программы см. в приложении 1).

3.3 Расчет составляющих радиационного баланса

Общий вид уравнения радиационного баланса подстилающей поверхности представлен в предыдущей главе. В более привычном виде его можно записать следующим образом:

$$(16)$$

где R – радиационный баланс, Alb – альbedo подстилающей поверхности, Q – суммарная радиация, $E_{эф}$ – эффективное излучение.

Для расчета составляющих радиационного баланса в настоящей работе была использована метеорологическая модель радиации, описанная в работе (Psiloglou V. E., Kambezidis H. D., 2006). Главное преимущество такой модели состоит в том, что для ее работы требуется минимальный объем исходных данных. Задавая только температуру воздуха, относительную влажность, атмосферное давление и время суток и географические координаты места, можно получить все необходимые характеристики коротковолновой радиации на плоской поверхности.

Поток суммарной радиации Q равен сумме прямой и рассеянной радиации. Прямую радиацию на горизонтальную поверхность при отсутствии облачности можно определить, зная значение ее потока на верхней границе атмосферы и условия ее ослабления атмосферными газами по метеорологической модели радиации.

Значение солнечной радиации на верхней границе атмосферы S рассчитывается по формуле Спенсера:

$$(17)$$

где $S_0=1366 \text{ Вт/м}^2$ – солнечная постоянная, Da – дата дня расчета, считая от начала календарного года.

Далее для каждого срока определяется высота над горизонтом и азимут солнца по приведенным ниже формулам:

где H_s – высота солнца над горизонтом, A_s – азимут солнца (отсчитываемый от юга), φ и λ – широта и долгота точки, где производится расчет радиационного баланса, δ – склонение солнца, τ – часовой угол солнца, UT – универсальное время.

Поток прямой радиации на горизонтальную поверхность выражается следующим образом:

$$(19)$$

где F – интегральные функции пропускания коротковолновой радиации атмосферными газами (O_3 , CO_2 , CO , N_2O , CH_4 , O_2), водяным паром (w), ослабление аэрозолями (a), рэлеевское рассеяние (R).

$$(20)$$

Здесь m и m_l – оптическая масса идеальной атмосферы и ее исправленное значение с поправкой на отличие реального атмосферного давления P от стандартного $P_0=1013$ гПа, u_i показывает концентрацию газа в столбе атмосферы и принимается постоянным для всех газов, кроме водяного пара (: $u_{CH_4}=1.6$, $u_{CO_2}=380$, $u_{CO}=0.075$, $u_{N_2O}=0.28$, $u_{O_2}=2.095 \cdot 10^5$), β – параметр мутности Ангстрема, вычисляемый по формуле Янга, H – абсолютная высота точки, для которой производится расчет.

Значения a_i , b_i , c_i , d_i , коэффициентов, зависящих от поглотителя, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов a, b, c, d (Psiloglou B. E., Kambezidis H. D., 2006).

| | a | b | c | d |
|------------|----------|----------|----------|----------|
| H2O | 3.0140 | 119.300 | 0.6440 | 5.8140 |
| O3 | 0.2554 | 6107.26 | 0.2040 | 0.4710 |
| CO2 | 0.7210 | 377.890 | 0.5855 | 3.1709 |
| CO | 0.0062 | 243.670 | 0.4246 | 1.7222 |
| N2O | 0.0326 | 107.413 | 0.5501 | 0.9093 |
| CH4 | 0.0192 | 166.095 | 0.4221 | 0.7186 |
| O2 | 0.0003 | 476.934 | 0.4892 | 0.1261 |

Рассеянная радиация в условиях ясного неба, согласно метеорологической модели радиации, рассчитывается по формуле:

$$(21)$$

a_g – альbedo подстилающей поверхности и атмосферы, a_s – альbedo аэрозольного рассеяния в атмосфере, a_R – альbedo молекулярного рассеяния.

Переход от значений радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, к значениям радиации, приходящей на склон, производится по методу Кондратьева (Кондратьев К.Я., 1965):

$$(22)$$

где S_{sl} , D_{sl} — прямая, рассеянная радиации на склон, а R_r — радиация, отраженная на склон окружающими поверхностями.

Для учета влияния затенения на коротковолновый радиационный баланс используется значение угла горизонта в направлении, совпадающем с азимутом солнца. Расчет поля затенения производится для каждого срока следующим образом.

Для каждого узла цифровой модели рельефа сравнивается угол горизонта и высота солнца. Если угол горизонта в направлении на солнце больше высоты солнца, точка затенена, прямая радиация в ней отсутствует. В противном случае прямая радиация не меняется. В данной работе учет затенения производился путем введения множителя b в расчет прямой радиации. Если точка затенена $b=0$, если открыта $b=1$.

(23)

В формуле (23) – прямая радиация с учетом затенения.

Рассеянная радиация D_{SVF} с учетом интегральной закрытости в точке будет выражаться следующим образом:

(24)

Таким образом, поток суммарной радиации на поверхность с углом наклона α ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) с учетом затенения и закрытости горизонта будет равен:

(25)

Эффективное излучение (E_e) состоит из длинноволнового излучения земли (E_s) и противоизлучения атмосферы (E_a).

(26)

Длинноволновое излучение земли обычно рассчитывают, предположив, что почва или растительный покров эквивалентны бесконечно глубокому серому телу с однородной температурой и излучательной способностью близкой к единице (Братсерт У.Х., 1985):

$$E_s = \sigma T_s^4 \quad (27)$$

Для более точного расчета противоизлучения атмосферы при ясном небе требуются данные о вертикальном профиле влажности и температуры. Однако измерить эти характеристики довольно сложно. В связи с этим было разработано множество расчетных методов, здесь приведены некоторые из них:

$$E_a = (0.83 - 0.18 \exp(-0.154 e)) \sigma (T_a)^4 \quad (28)$$

$$E_a = (0.52 + 0.065 e^{0.5}) \sigma (T_a)^4 \quad (29)$$

$$(30)$$

где (28) – формула Ангстрема (1916); (29) – формула Брента (1933); (30) – формула Братсерга (1985); e – парциальное давление водяного пара, T_a – температура воздуха.

$$(31)$$

где (31) – формула Русина для эффективного излучения (2010), T_d – точка росы, k – коэффициент Русина, δ – коэффициент серости.

В данной работе расчет эффективного излучения проводился по формуле Русина.

Точка росы рассчитывается по температуре и относительной влажности по соотношениям, выведенным из формулы Магнуса:

$$(32)$$

Где T_d – точка росы, a и b – коэффициенты из формулы Магнуса, f – относительная влажность воздуха.

Температура воздуха с высотой изменяется, как в стандартной атмосфере: $T_a(z) = t_0 - 6.5 * z$, где z – высота над земной поверхностью, t_0 – приземная температура воздуха, а относительная влажность принята постоянной и равной 60%.

Подставляя эти данные в формулу Русина, получим значения эффективного излучения в любой точке цифровой модели рельефа.

Определить влияние закрытости на эффективное излучение можно по следующей формулам:

$$E_{SVF} = E * SVF \quad (33)$$

где E_{SVF} – эффективное излучение с учетом функции закрытости, E_c – добавочное ДВ излучение от соседних склонов.

Чтобы учесть разницу температур воздуха и подстилающей поверхности в значения радиационного баланса необходимо ввести поправку, зависящую от скорости ветра. В настоящей работе она была принята постоянной при скорости ветра 5 м/с.

(34)

(35)

Результаты расчетов, произведенных по описанной выше модели приведены в следующей главе (блок-схему программы для расчета составляющих радиационного баланса см. в приложении 1).

3.4 Генерация моделей рельефа

Для верификации алгоритма расчета значений функции закрытости в работе (Русин И.Н., Бельмас Н.А., 2016) был использован ряд моделей городской застройки, представленный в виде улиц и перекрестков с различными параметрами (ширина улиц, высота домов), построение которых не требует отдельных формул. Далее на рисунке 4 изображены примеры таких моделей.

Для изучения влияния закрытости горизонта на разных пространственных масштабах в настоящей работе были использованы три основных типа регулярного рельефа: плоскость, возвышенность и впадина (котловина). Для их моделирования была создана небольшая программа, которая позволяет строить регулярный рельеф с различными характеристиками в зависимости от заданных параметров. Формулы приведены далее:

- 1) плоскость (рис. 5a)

$$(33)$$

- 2) гора (рис. 5b)

$$(34)$$

- 3) котловина (рис.5с)

$$(35)$$

– высота в узле цифровой модели рельефа с координатами (x, y) , $H_{\text{средн}}$ - средняя высота местности над уровнем моря, b и c – тангенсы углов наклона по осям OX и OY , - превышение (отрицательное в случае котловины), x_0, y_0 – координаты вершины горы (нижней точки котловины).

Кроме простых типов также были рассмотрены различные их комбинации, например, модель горной местности, состоящая из нескольких возвышенностей и котловин, горные хребты, вытянутые долины и т.п.

Для выявления степени влияния масштаба на функцию закрытости был создан ряд подобных моделей рельефа, где вертикальные и горизонтальные расстояния были уменьшены или увеличены, без изменения их соотношения.

Рис. 4. Цифровые модели элементов городского ландшафта (слева – улица, справа – перекресток).

a)

b)

c)

Рис.5. Цифровые модели регулярного рельефа: а) наклонной плоскости, б) одиночной горы, с) одиночной котловины.

Однако в естественных условиях нет абсолютно регулярного рельефа, всегда присутствует элемент случайности, и, хотя использование строгих математических моделей дает возможность изучить основные закономерности изменения закрытости горизонта, для более полного исследования необходимо также рассматривать модели со случайными возмущениями (рис. 6).

В работах (Helbig N. , Löwe 2012) было показано, что наилучшим образом случайные поля рельефа можно воспроизвести, аппроксимируя их изотропными гауссовскими случайными полями.

В настоящей работе был исследован предельный случай полей рельефа с корреляцией близкой к 0, и выявлено, что результаты, полученные на его основе, мало отличаются от результатов, полученных на основе полей рельефа с нулевой корреляцией. Поэтому, чтобы снизить число степеней свободы и для некоторого упрощения задачи исследования закрытости производились на моделях рельефа без корреляции.

Для создания случайных полей рельефа был использован генератор случайных чисел с нормальным распределением. Созданная с его помощью случайная величина записывалась в узлы регулярной сетки.

На рис. 7 показаны примеры горизонтальных профилей рельефа с различными среднеквадратическими отклонениями высот (от 0,5 до 100 м).

Для получения всех моделей рельефа в данной работе использовалась сетка 101x101 точек с переменным расстоянием между узлами.

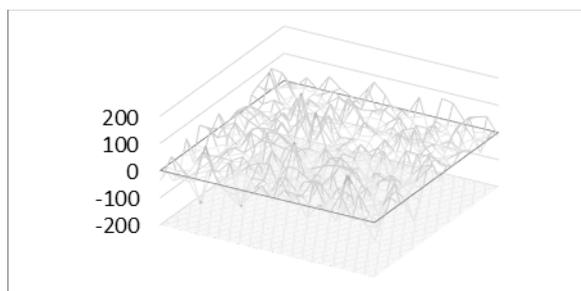


Рис. 6. Цифровая модель случайного рельефа.

Рис. 7. Горизонтальные профили рельефа цифровых моделей с различными СКО высот.

Глава 4. Результаты

В настоящей работе было произведено достаточно много расчетов с использованием различных моделей рельефа (городская застройка, горная, холмистая местность, хребты, впадины, случайный рельеф и др.). В данной главе приведены результаты наиболее значимых экспериментов.

Для расчета составляющих радиационного баланса были использованы 6 стандартных сроков актинометрических наблюдений в 0.30, 6.30, 9.30, 12.30, 15.30, 18.30 и два дополнительных срока в 21.30 и 3.30.

Расчет значений составляющих радиационного баланса для обеспечения сопоставимости результатов в настоящей работе производился для всех моделей на основе одинаковых начальных данных, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2. Начальные данные для расчета значений радиационного баланса.

| $\varphi, ^\circ$ | $\lambda, ^\circ$ | дата | Время UT | Давле ние на у.м., гПа | Темпе ратур а возду ха на у.м., $^\circ\text{C}$ | Относ итель ная влажн ость возду ха на у.м., % |
|-------------------|-------------------|----------------|-------------|---------------------------------|--|--|
| 44,00 | 37,00 | 05.08. 2010 | 03:30 | 1004, 2 | 16,5 | 60 |
| | | | 06:30 | 1004, 2 | 19,5 | 60 |
| | | | 09:30 | 1004, 2 | 25,7 | 60 |
| | | | 12:30 | 1004, 2 | 27,7 | 60 |
| | | | 15:30 | 1004, 2 | 26,7 | 60 |
| | | | 18:30 | 1004, 2 | 25,7 | 60 |
| | | | 21:30 | 1004, 2 | 24,7 | 60 |
| | | | 00:30 | 1004, 2 | 18,0 | 60 |

4.1 Верификация алгоритма расчета значений функции закрытости

Для верификации алгоритма Дозье-Бруно и выявления общих закономерностей распределения значений функции закрытости были выбраны три простейшие симметричные модели местности (котловина, улица, перекресток), представленные на рис.8. При этом параметры таких моделей (диаметр и глубина котловины, ширина улиц, высота домов) задавались различные для анализа их влияния на результат расчета.

С помощью полученных данных можно исследовать влияние расположения точки на закрытость горизонта. Для этого удобно использовать диаграмму закрытости по сторонам света («розу закрытости»). Примеры таких диаграмм приведены на рис.9 для центральных точек заданных форм рельефа. В первом случае диаметр котловины составляет 40 м, глубина – 40 м. Как видно, значение функции закрытости в центральной точке этой котловины мало по всем направлениям. Это значит, что радиационный баланс в придонной части котловины практически полностью зависит от излучения боковых стен. Во втором случае, диаметр котловины равен 80 м, а глубина – 40 м. В центральной точке значение закрытости значительно больше аналогичного значения в предыдущем случае и составляет приблизительно 0,7. Поэтому даже на самом дне такой котловины радиационный баланс формируется уже в основном потоками радиации, приходящими от солнца и атмосферы. В нижнем ряду рисунка помещены диаграммы закрытости для центральных точек улицы и перекрестка. Они также вполне соответствуют ожидаемым распределениям, четко демонстрируя области открытых и закрытых зданиями участков горизонта. Полученные результаты дают возможность сказать, что радиационный баланс городских улиц, особенно при плотной застройке, во многом будет определяться соотношением высоты домов и ширины улиц, которое и будет формировать закрытость небосвода и перераспределение приходящих и уходящих потоков радиации. Поэтому очень важно учитывать такой параметр как функция закрытости при планировании городской застройки.

В целом можно сказать, что полученные диаграммы закрытости вполне соответствуют качественным представлениям о поведении этой функции и дополнительно позволяют получить количественные значения, важные для исследования более сложных форм рельефа.

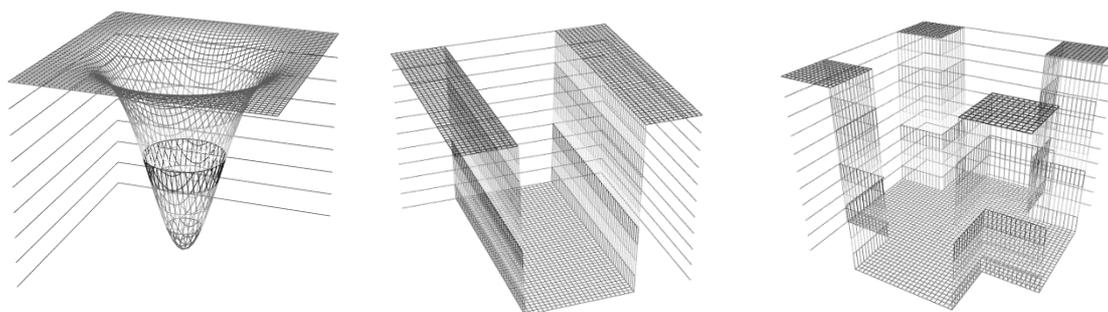


Рис.8. Модели рельефа, для которого производился расчет (котловина, улица, перекресток).

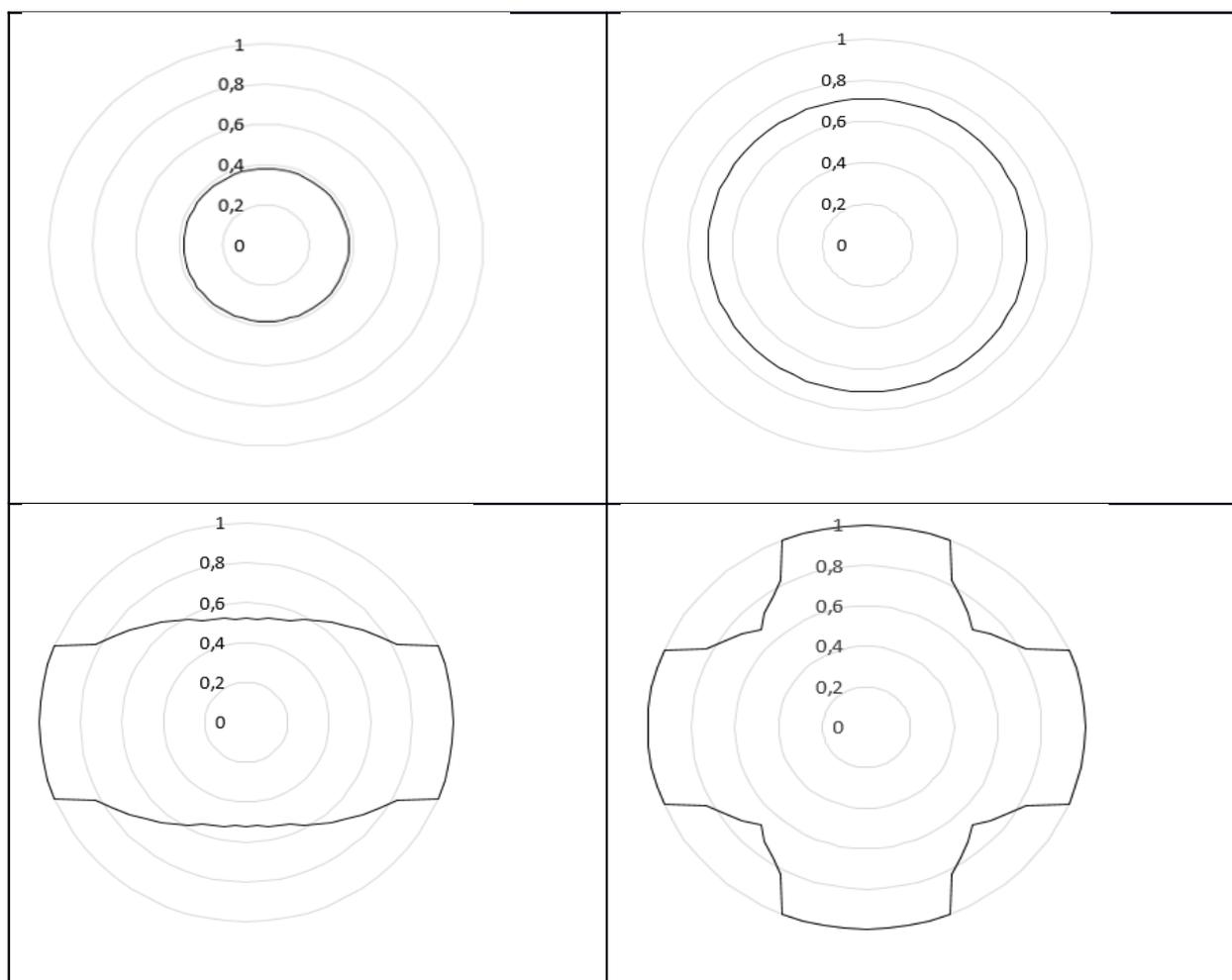


Рис.9. Диаграммы функции закрытости по сторонам света («роза закрытости») в центральной точке модели рельефа. Верхний ряд - котловины. Слева: диаметр котловины 40 м, глубина 40 м. Справа: диаметр 80 м, глубина 40 м. Внизу слева – улица, справа – перекресток (ширина улиц – 40 м, высота домов – 20 м).

Значение осредненной по всем направлениям функции закрытости в центральных точках моделей рельефа приведено на рис. 10. Данный рисунок показывает, как изменяется роль закрытости по мере увеличения тангенса угловой высоты препятствия (отношения высоты препятствия к расстоянию до него). Чем больше значение тангенса, тем ближе угол закрытости к 90° , т.е. препятствие все больше похоже на вертикальную стену. С помощью этих расчетов можно дать определение понятия «открытая местность», которое до сих пор используется в климатологии на интуитивном уровне.

Характерный вид зависимости средней закрытости от угловой высоты горизонта позволяет выделить три области. Малыми углами можно считать те, при которых отношение высоты препятствия к расстоянию до него меньше 0,2. Это соответствует значениям средней закрытости, большим чем 0,99. В этом случае в первом приближении местность можно считать открытой. Область минимальных значений средней закрытости начинается от значений угла горизонта примерно 75° , т.е. когда высота препятствий примерно в четыре раза больше расстояния до них. Наконец, в области изменения угла горизонта от 10° до 75° средняя функция закрытости убывает практически линейно. Отсюда следует, что для практических оценок радиационного баланса в условиях сложного рельефа очень важно установить предельное значение функции закрытости для характерных форм рельефа.

Понятно, что на значения средней закрытости влияние оказывает не только высота препятствия, но и расположение точки относительно центра модели рельефа. На рис. 11 для рассмотренных выше моделей рельефа приведены поля распределений по площади средних значений функции закрытости. В более узкой котловине средняя закрытость существенно больше (функция закрытости меньше), чем в широкой. Вблизи стен домов образуются минимальные значения функции закрытости, а в центральной части улицы или перекрестка - максимальные. Симметричное распределение средней закрытости определяется тем, что все точки освещаются небосводом одинаково со всех сторон, как это требуется из определения, так что симметричность выбранных моделей приводит к симметричности поля средней закрытости и делает его похожим на поле модельного рельефа.

Рис.10. Средняя закрытость в центральных точках моделей в зависимости от угловой высоты препятствия.

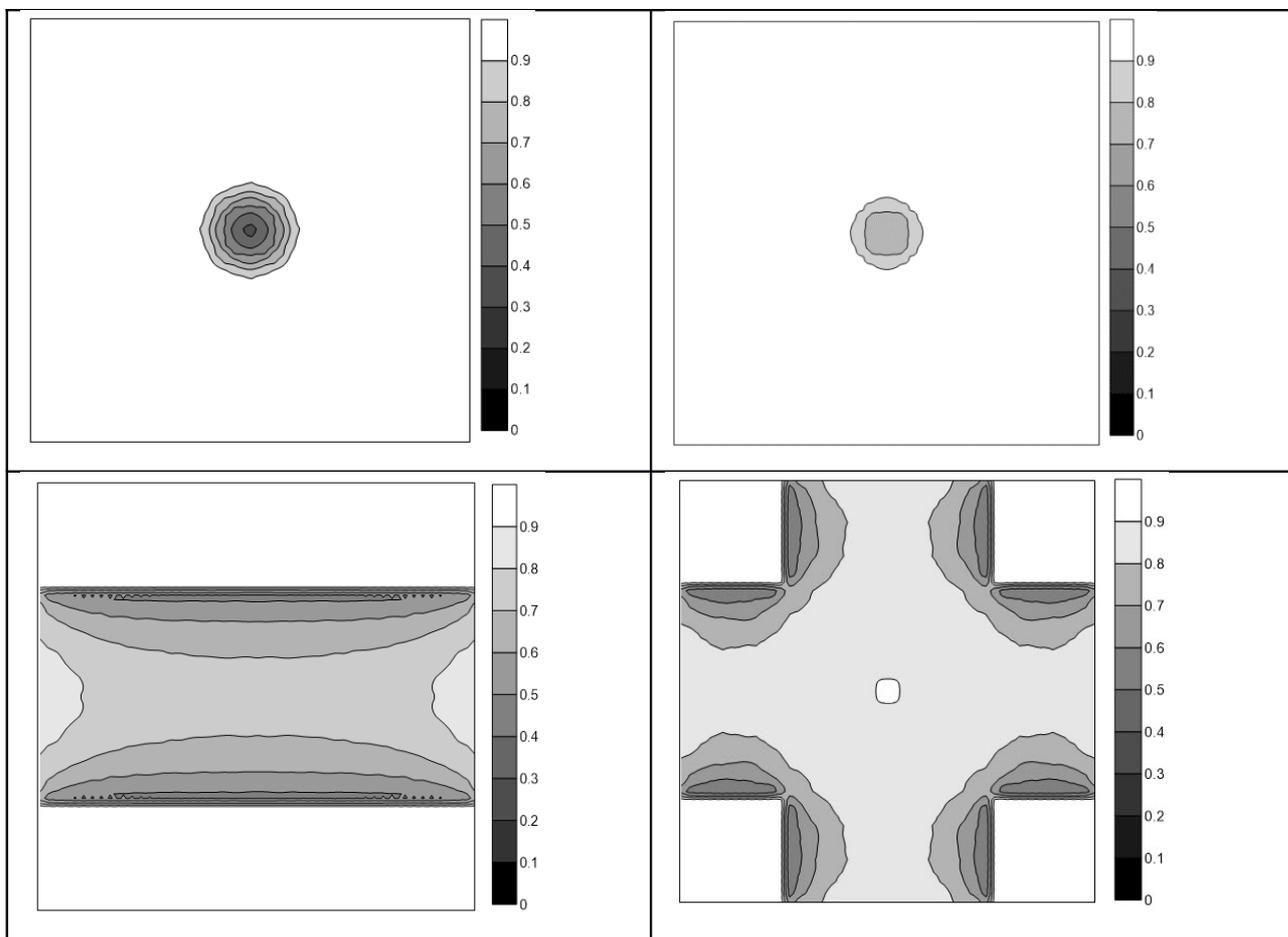


Рис.11. Поля средней закрытости в точках модельного рельефа. Верхний ряд котловины. Слева: диаметр котловины 40 м, глубина 40 м. Справа: диаметр котловины 80 м, глубина 40 м. Внизу слева – улица, справа – перекресток (ширина улиц – 40 м, высота домов – 20 м).

Далее для того, чтобы проиллюстрировать результаты использования рассматриваемого метода в практических вычислениях функции закрытости на реальном рельефе, он был применен к цифровой модели ледника Альдегонда (Шпицберген) (рис.12).

В работе (Русин И.Н., Пикалева А.А., 2012) функция закрытости для этой территории была оценена методом Оке и оказалась, что она меняется в пределах 0.9880.998. В данной работе применен значительно более точный метод расчета функции закрытости. Результат расчета приведен на рис. 13.

Сразу видно, что реальный несимметричный рельеф порождает очень сложное поле средней закрытости. Даже в самой ровной центральной части ледника имеют место существенные изменения средней закрытости, выходящие за пределы тех значений, которые были получены в работе (Русин И.Н., Пикалева А.А., 2012). На границах ледника, где высоты меняются очень значительно, изменчивость средней закрытости возрастает. Этот эффект совершенно не проявился при использовании метода, предложенного в (Русин И.Н., Пикалева А.А., 2012).

На рис.13 хорошо прослеживаются характерные изменения функции закрытости в зависимости от формы рельефа. В нижнем правом углу рисунка и верхнем левом углу замкнутыми изолиниями функции закрытости с минимальным значением в центре четко обрисовывается несколько котловин. На остальной площади ледника вариации функции закрытости, очевидно, объясняются более мелкомасштабными перепадами высот, не проявившимися при построении изображения в данных градациях.

Такие значительные изменения средней закрытости неизбежно приведут к резким изменениям радиационного баланса в различных частях ледника и скажутся на точности расчета остальных составляющих его энерго-массообмена с атмосферой.

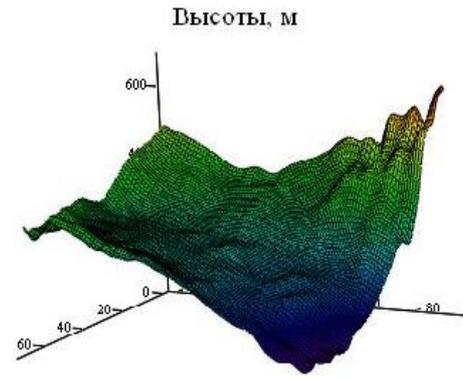


Рис.12. Слева: ледник Альдегонда. Справа: Цифровая модель ледника Альдегонда (параметры ледника: длина 3.5 км, ширина 2 км, а максимальная высота 700 м).

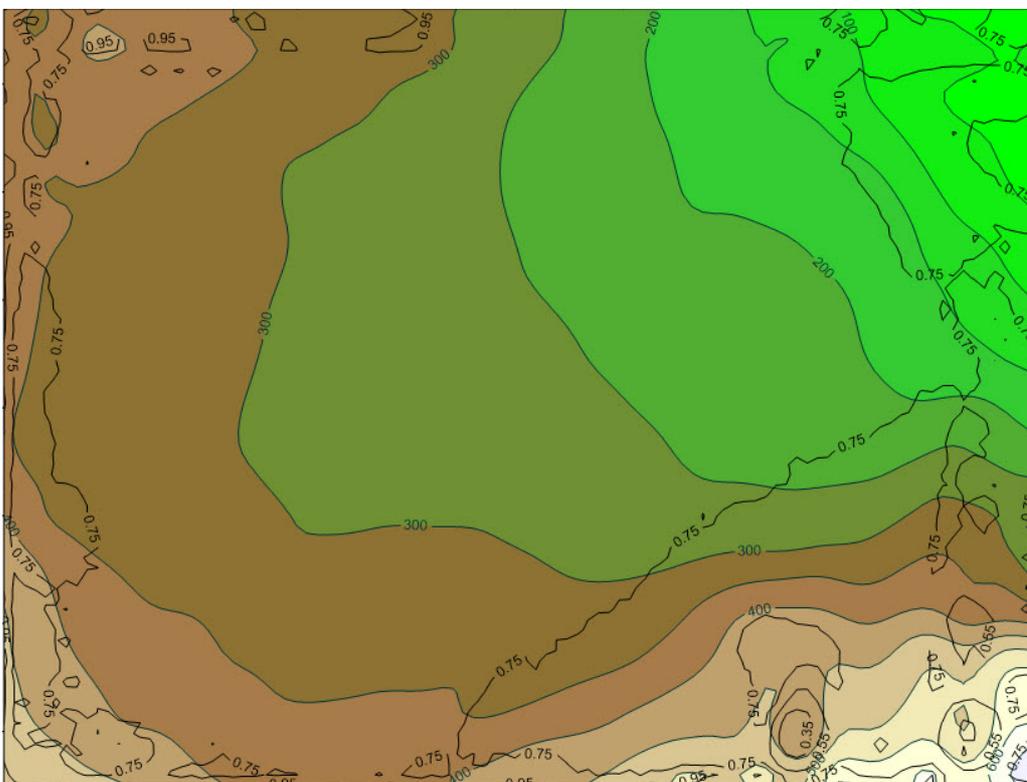


Рис.13. Высоты рельефа (показано цветом) и поле функции закрытости (изолинии черного цвета) для ледника Альдегонда (Шпицберген).

4.2 Расчет значений составляющих радиационного баланса.

4.2.1 Зависимость радиационных потоков от значения функции закрытости на моделях регулярного рельефа.

В первом эксперименте была поставлена задача - выявить общие закономерности изменения закрытости по территории на гладких крупномасштабных формах рельефа и ее влияние на составляющие радиационного баланса. Для этого было построено несколько моделей, характеристики которых приведены в таблице 3. В этой же таблице представлены и результаты расчета.

В ходе эксперимента были исследованы составляющие радиационного баланса на различных моделях регулярного рельефа. В таблице 3 представлены осредненные по площади результаты расчета за два срока - 9:30 по местному времени (6:30 UT), когда высота солнца велика и составляет 63° , а влияние закрытости минимально, и 12:30 (9:30 UT), когда солнце находится ниже над горизонтом (высота 42°).

Как показывает таблица 3, даже при больших высотах солнца роль закрытости хорошо заметна. При одинаковых углах наклона склона, значения SVF очень близки, и соответственно близки и изменения, которые закрытость вносит в значения составляющих радиационного баланса. Чем больше угол наклона склона, тем сильнее влияние закрытости.

Кроме того, из таблицы 3 видно, что даже небольшие углы наклона (3°) поверхности порождают изменения радиационного баланса.

На плоскости составляющие радиационного баланса не зависят от шага сетки и имеют постоянные значения, которые были приняты за эталонные для выявления изменений, вносимых неровностями земной поверхности. Данные значения также приведены в таблице 3.

Результаты расчетов на всех остальных моделях показали уменьшение значений составляющих радиационного баланса по сравнению с плоскими значениями, т.к. проявляется влияние закрытости и затенения. Например, при среднем значении функции закрытости около 0,9 (90% небесной полусферы открыто), разница в средних значениях радиационного баланса может достигать 17%.

На модели котловины среднее значение функции закрытости всегда несколько больше (т.е. большая доля неба открыта), а радиационный баланс меньше, чем на модели горы. Объясняется это тем, что котловина формирует закрытость только на внутренних точках, а гора может закрывать любую точку рассматриваемого участка местности. Поэтому доля полностью открытых точек на модели горы получается значительно меньше, чем на модели котловины.

Средние значения прямой радиации на модели горы немного больше, чем на модели котловины. Как известно, на склон приходит прямой радиации тем больше, чем ближе к нормали угол падения солнечных лучей. На освещенный склон горы приходит больше солнечной радиации, чем на склон котловины аналогичной крутизны, т.к. в котловине часть его будет закрыта соседней стенкой.

Значения рассеянной радиации и эффективного излучения больше на модели котловины, что обусловлено, прежде всего, разницей высот. Рассеянная радиация в данном случае будет расти за счет увеличения параметра мутности атмосферы, зависящего от толщины слоя воздуха, который проходят солнечные лучи. Эффективное излучение для горы будет меньше из-за падения температуры с высотой. В рассматриваемых нами случаях разница высот составляет 200 м и 1000 м. Перечисленные факторы приводят к тому, что значения составляющих радиационного баланса для моделей горы и котловины с одинаковыми параметрами и модулями высот в приведенном примере различаются на значения от 1 до 4,5%.

В целом препятствия с углом наклона около 27° провоцируют изменения значений прямой радиации по сравнению значением на плоскости до 16%, рассеянной – до 20%, а эффективного излучения до 14%.

При изменении горизонтального масштаба (шага сетки) все закономерности, описанные выше, сохраняются.

Таблица 3. Зависимость радиационных потоков от значения функции закрытости на моделях регулярного рельефа.

| Модель | Δ | H, м | R, м | $\alpha, ^\circ$ | $V_{\text{средн}}$ | $V_{\text{средн}} - V_{\text{плоск}}, \%$ | $S_{\text{средн}}$ | $S_{\text{средн}} - S_{\text{плоск}}, \%$ | $D_{\text{средн}}$ | $D_{\text{средн}} - D_{\text{плоск}}, \%$ | $E_{\text{средн}}$ | $E_{\text{средн}} - E_{\text{плоск}}, \%$ |
|-----------------------|----------------|----------|----------|------------------|--------------------|---|--------------------|---|--------------------|---|--------------------|---|
| Время 9:30 (6:30 UT) | | | | | | | | | | | | |
| Котловина | 1 0 | -100 | 1000 | -5,7 | 401,90 | 1,5 | 497,37 | 1,6 | 88,55 | 1,5 | 184,98 | 1,1 |
| Гора | 1 0 | 100 | 1000 | 5,7 | 403,31 | 1,2 | 499,10 | 1,2 | 87,69 | 2,4 | 184,47 | 1,4 |
| Котловина | 1 0 | -500 | 1000 | -26,6 | 340,87 | 16,5 | 428,80 | 15,1 | 76,23 | 15,2 | 165,61 | 11,5 |
| Гора | 1 0 | 500 | 1000 | 26,6 | 346,04 | 15,2 | 433,28 | 14,3 | 72,22 | 19,6 | 161,72 | 13,6 |
| Плоскость | 1 0 | 0 | - | 0,0 | 408,12 | 0,0 | 505,36 | 0,0 | 89,87 | 0,0 | 187,12 | 0,0 |
| Котловина | 2 0 | -100 | 2000 | -2,9 | 406,00 | 0,5 | 502,53 | 0,6 | 89,79 | 0,1 | 186,61 | 0,3 |
| Гора | 2 0 | 100 | 2000 | 2,9 | 407,34 | 0,2 | 504,37 | 0,2 | 89,02 | 1,0 | 186,35 | 0,4 |
| Котловина | 2 0 | -500 | 2000 | -14,0 | 377,79 | 7,4 | 468,81 | 7,2 | 84,18 | 6,3 | 177,57 | 5,1 |
| Гора | 2 0 | 500 | 2000 | 14,0 | 384,20 | 5,9 | 476,35 | 5,7 | 80,61 | 10,3 | 175,30 | 6,3 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | - | 0 | 408,12 | 0,0 | 505,36 | 0,0 | 89,87 | 0,0 | 187,12 | 0,0 |
| Время 12:30 (9:30 UT) | | | | | | | | | | | | |
| Котловина | 1 0 | -100 | 1000 | -5,7 | 622,84 | 1,5 | 715,78 | 1,5 | 98,00 | 1,5 | 192,08 | 1,1 |
| Гора | 1 0 | 100 | 1000 | 5,7 | 624,36 | 1,2 | 717,72 | 1,3 | 97,03 | 2,4 | 191,58 | 1,4 |
| Котловина | 1 0 | -500 | 1000 | -26,6 | 535,61 | 15,3 | 620,98 | 14,6 | 84,40 | 15,1 | 171,95 | 11,5 |
| Гора | 1 0 | 500 | 1000 | 26,6 | 541,63 | 14,3 | 626,81 | 13,8 | 79,89 | 19,7 | 167,97 | 13,6 |

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------|----------|----------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|---------------|------------|
| Плоскость | 1 0 | 0 | - | 0,0 | 632,14 | 0 | 727,00 | 0 | 99,45 | 0 | 194,31 | 0 |
| Котловина | 2 0 | -100 | 2000 | -2,9 | 629,17 | 0,5 | 723,23 | 0,5 | 99,38 | 0,1 | 193,78 | 0,3 |
| Гора | 2 0 | 100 | 2000 | 2,9 | 630,61 | 0,2 | 725,29 | 0,2 | 98,49 | 1,0 | 193,52 | 0,4 |
| Котловина | 2 0 | -500 | 2000 | -14,0 | 588,29 | 6,9 | 676,48 | 6,9 | 93,22 | 6,3 | 184,36 | 5,1 |
| Гора | 2 0 | 500 | 2000 | 14,0 | 594,88 | 5,9 | 684,68 | 5,8 | 89,17 | 10,3 | 182,08 | 6,3 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | - | 0,0 | 632,14 | 0,0 | 727,00 | 0,0 | 99,45 | 0,0 | 194,31 | 0,0 |

Δ – шаг сетки; H – характерная высота; R – радиус элемента рельефа, $SVF_{\text{средн}}$ – среднее по территории значение функции закрытости; $V_{\text{средн}}$, $S_{\text{средн}}$, $D_{\text{средн}}$, $E_{\text{средн}}$ – средние по территории значения радиационного баланса, прямой, рассеянной радиации, эффективного излучения, соответственно; $V_{\text{средн}} - V_{\text{плоск}}$, $S_{\text{средн}} - S_{\text{плоск}}$, $D_{\text{средн}} - D_{\text{плоск}}$, $E_{\text{средн}} - E_{\text{плоск}}$ – разницы значений составляющих радиационного баланса на плоской поверхности и на заданном рельефе.

4.2.2 Выявление зависимости радиационных потоков от значения функции закрытости на моделях случайного рельефа.

Для того, чтобы исследовать влияние микро- и мезомасштабных изменений высоты рельефа на функцию закрытости и радиационный баланс участка, были проведены эксперименты, в которых на горизонтальную плоскость были наложены случайные изменения высот рельефа с различными среднеквадратическими отклонениями. Результаты этих расчетов показаны в таблице 4.

С увеличением расчлененности и ростом характерного угла наклона склона мезошероховатости, определяемых через отношение СКО к шагу сетки цифровой модели рельефа, средние по площади значения потоков радиации и радиационного баланса резко убывают по отношению к значениям на плоской поверхности. При этом видно, что данные различия в процентном соотношении практически одинаковы

Ниже приведены графики полученных зависимостей средних по территории значений составляющих радиационного баланса (в 12:30 по местному времени) от функции закрытости.

Как показано при выводе формул, все составляющие радиационного баланса пропорциональны функции закрытости, что и подтверждают графики, приведенные на рис. 14, 15. Интересно, что на эти графики хорошо укладываются и зависимости радиационных потоков от SVF для регулярного рельефа.

Осредненные по участку значения потоков радиации, составляющих радиационный баланс участка, закономерно меняются в зависимости от среднего значения SVF. Рассеянная радиация линейно убывает, по мере уменьшения значения SVF, т.е. с ростом закрытости участка. Эффективное излучение также линейно убывает с ростом закрытости, но в силу того, что температура воздуха также убывает с высотой, независимо от SVF, эффективное излучение убывает с несколько большей скоростью, чем рассеянная радиация. Значение средней по участку прямой радиации убывают с ростом закрытости наиболее сильно. Темп убывания ослабевает, по мере приближения SVF к единице, так что при значениях SVF больших 0,95 участок можно считать открытым и влиянием закрытости в расчетах потоков радиации пренебречь.

Рис.14 Зависимость радиационного баланса ($B_{\text{ср}}/B_{\text{пл}}$) и прямой радиации ($S_{\text{ср}}/S_{\text{пл}}$) (в % от значения на плоскости) от закрытости (регул – регулярный рельеф, случ – случайный рельеф).

Рис. 15 Зависимость рассеянной радиации ($D_{\text{ср}}/D_{\text{пл}}$) и эффективного излучения ($E_{\text{ср}}/E_{\text{пл}}$) (в % от значения на плоскости) от закрытости (регул – регулярный рельеф, случ – случайный рельеф).

На рис. 16 изображены аналогичные графики для двух сроков (9:30 и 12:30 UTC). При их сопоставлении видно, что зависимости рассеянной радиации и эффективного излучения от функции закрытости универсально применимы для различных сроков наблюдения. Зависимость прямой солнечной радиации от функции закрытости меняется от срока к сроку под влиянием изменения затенения. В результате изменчивости зависимости прямой радиации от функции закрытости меняется от срока к сроку и зависимость от SVF радиационного баланса. Однако для разных сроков зависимость среднего по участку радиационного баланса от средней по участку прямой солнечной радиации остается линейной (со слабо меняющимся наклоном и существенно меняющимся постоянным коэффициентом).

При рассмотрении случайного рельефа, функцию закрытости также следует считать случайной величиной, а произведенные в ходе эксперимента 2 расчета позволяют установить закон ее распределения. Поскольку функция закрытости, по определению, является ограниченной и меняется от 0 до 1, то было принято решение аппроксимировать ее значения вета распределением вероятностей. На рис. 17 показаны эмпирические повторяемости функции закрытости и аппроксимирующий закон beta распределения, параметры которого вычислены по формулам Вадзинского с помощью оценок среднего и СКО.

Из таблицы 4 видно, что учет небольшой шероховатости с СКО до 5 м при шаге сетки 20 м не дает существенных изменений составляющих радиационного баланса по сравнению с их значениями на плоскости. Отклонения средних значений прямой радиации в данном случае достигает 3,0%, рассеянной – 67%, эффективного излучения – 5,3%, а самого радиационного баланса – 2,2%. Далее с увеличением размера препятствий растут и различия, достигая 90% при СКО= 80 м и среднем угле наклона 70°.

a)

b)

c)

d)

Рис. 16 Зависимость а) радиационного баланса ($B_{cp}/B_{пл}$), б) прямой ($S_{cp}/S_{пл}$) и в) рассеянной радиации ($D_{cp}/D_{пл}$) и д) эффективного излучения ($E_{cp}/E_{пл}$) (в % от значения на плоскости) от закрытости.

Рис. 17 Функция распределения закрытости для модельных полей рельефа с различным СКО высот (синяя кривая) и аппроксимирующий закон beta распределения (красная кривая).

В таблице 4 прослеживается хорошо выраженная зависимость средних по территории значений функции закрытости от СКО рельефа. Поскольку отношение СКО к шагу сетки можно интерпретировать как оценку тангенса характерного угла наклона мезошероховатости рельефа, то в 5-ом столбце таблицы приведены соответствующие углы. Зависимость среднего SVF от тангенса характерного угла показана на рис. 18. Там же приведена линия тренда и его оценка. Кроме того, на следующем рис. 19 приведена зависимость SVF от СКО высот рельефа. С помощью данных графиков можно оценить значение радиационного баланса в % от баланса на плоской поверхности на основе данных о закрытости горизонта.

Рис. 18 Зависимость среднего по территории значения функции закрытости от среднего тангенса угла наклона склона.

Рис. 19. Зависимость среднего по территории значения функции закрытости от среднеквадратического отклонения высот рельефа.

Таблица 4. Зависимость радиационных потоков от значения функции закрытости на моделях случайного рельефа.

| Модель | Δ | $H_{\text{средн}}, \text{ м}$ | СКО, м | $\alpha, ^\circ$ | $\text{tg}(\alpha, ^\circ)$ | $SVF_{\text{средн}}$ | $V_{\text{средн}}$ | $\frac{V_{\text{ср}}}{V_{\text{плоск}}}, \%$ | $S_{\text{средн}}$ | $\frac{S_{\text{средн}}}{S_{\text{плоск}}}, \%$ | $D_{\text{средн}}$ | $\frac{D_{\text{средн}}}{D_{\text{плоск}}}, \%$ | $E_{\text{средн}}$ | $\frac{E_{\text{средн}}}{E_{\text{плоск}}}, \%$ |
|----------------------|----------|-------------------------------|--------|------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------|--|--------------------|---|--------------------|---|--------------------|---|
| Время 9:30 (6:30 UT) | | | | | | | | | | | | | | |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0,0 | 1,000 | 408,12 | 0,0 | 505,36 | 0,0 | 89,87 | 0,0 | 187,12 | 0,0 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 0,5 | 1,3 | 0,0 | 0,999 | 407,96 | 0,0 | 505,13 | 0,0 | 89,80 | 0,1 | 187,00 | 0,1 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 1 | 2,6 | 0,0 | 0,997 | 407,83 | 0,1 | 504,75 | 0,1 | 89,58 | 0,3 | 186,63 | 0,3 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 5 | 12,5 | 0,2 | 0,947 | 397,34 | 2,6 | 488,40 | 3,4 | 83,88 | 6,7 | 177,27 | 5,3 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 10 | 23,0 | 0,4 | 0,860 | 343,20 | 15,9 | 425,61 | 15,8 | 73,56 | 18,1 | 160,82 | 14,1 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 15 | 32,0 | 0,6 | 0,773 | 281,02 | 31,1 | 356,55 | 29,4 | 63,42 | 29,4 | 144,63 | 22,7 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 20 | 38,5 | 0,8 | 0,709 | 231,42 | 43,3 | 298,57 | 40,9 | 55,49 | 38,3 | 131,86 | 29,5 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 25 | 44,1 | 1,0 | 0,650 | 189,92 | 53,5 | 257,56 | 49,0 | 49,38 | 45,1 | 121,54 | 35,0 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 30 | 48,6 | 1,1 | 0,600 | 156,04 | 61,8 | 220,83 | 56,3 | 44,05 | 51,0 | 112,24 | 40,0 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 35 | 52,6 | 1,3 | 0,562 | 133,06 | 67,4 | 195,71 | 61,3 | 39,87 | 55,6 | 105,07 | 43,8 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 40 | 55,8 | 1,5 | 0,528 | 110,73 | 72,9 | 171,39 | 66,1 | 36,34 | 59,6 | 98,64 | 47,3 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 45 | 58,3 | 1,6 | 0,497 | 97,70 | 76,1 | 156,42 | 69,0 | 33,43 | 62,8 | 92,89 | 50,4 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 50 | 60,9 | 1,8 | 0,465 | 81,22 | 80,1 | 137,85 | 72,7 | 30,48 | 66,1 | 86,99 | 53,5 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 55 | 62,9 | 1,9 | 0,450 | 77,94 | 80,9 | 133,72 | 73,5 | 28,96 | 67,8 | 84,16 | 55,0 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--------|---|-----|----------|-----|-------|-------|----------|--------|------|-------|------|-------|------|
| | 0 | | | 5 | | | | 9 | | | | | | |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 60 | 64, 4 | 2,1 | 0,427 | 65,07 | 84, 1 | 119,02 | 76,4 | 26,90 | 70,1 | 79,72 | 57,4 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 65 | 65, 8 | 2,2 | 0,408 | 60,66 | 85, 1 | 113,40 | 77,6 | 25,32 | 71,8 | 76,25 | 59,3 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 70 | 67, 4 | 2,4 | 0,390 | 50,93 | 87, 5 | 102,35 | 79,7 | 23,71 | 73,6 | 72,83 | 61,1 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 75 | 68, 4 | 2,5 | 0,377 | 45,04 | 89, 0 | 95,29 | 81,1 | 22,64 | 74,8 | 70,33 | 62,4 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 80 | 69, 9 | 2,7 | 0,358 | 37,94 | 90, 7 | 86,41 | 82,9 | 21,09 | 76,5 | 66,80 | 64,3 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 100 | 72, 8 | 3,2 | 0,319 | 27,84 | 93, 2 | 72,85 | 85,6 | 18,01 | 80,0 | 59,56 | 68,2 |

| Модель | Δ | $H_{\text{средн}}, \text{ м}$ | СКО, м | $\alpha, ^\circ$ | $\text{tg}(\alpha, ^\circ)$ | $\text{SVF}_{\text{средн}}$ | $V_{\text{средн}}$ | $V_{\text{средн}} - V_{\text{плоск}}, \%$ | $S_{\text{средн}}$ | $S_{\text{средн}} - S_{\text{плоск}}, \%$ | $D_{\text{средн}}$ | $D_{\text{средн}} - D_{\text{плоск}}, \%$ | $E_{\text{средн}}$ | $E_{\text{средн}} - E_{\text{плоск}}, \%$ |
|-----------------------|-----------|-------------------------------|-----------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|---|--------------------|---|--------------------|---|--------------------|---|
| Время 12:30 (9:30 UT) | | | | | | | | | | | | | | |
| Плоскость | 20 | 0 | - | 0,0 | 0,0 | 1,000 | 632,14 | 0,0 | 727,00 | 0,0 | 99,45 | 0,0 | 194,31 | 0,0 |
| Плоскость | 20 | 0 | 0,5 | 1,3 | 0,0 | 0,999 | 631,97 | 0,0 | 726,74 | 0,0 | 99,38 | 0,1 | 194,19 | 0,1 |
| Плоскость | 20 | 0 | 1 | 2,6 | 0,0 | 0,997 | 631,58 | 0,1 | 726,10 | 0,1 | 99,13 | 0,3 | 193,81 | 0,3 |
| Плоскость | 20 | 0 | 5 | 12,5 | 0,2 | 0,947 | 616,88 | 2,4 | 705,40 | 3,0 | 92,82 | 6,7 | 184,09 | 5,3 |
| Плоскость | 20 | 0 | 10 | 23,0 | 0,4 | 0,860 | 576,46 | 8,8 | 656,10 | 9,8 | 81,41 | 18,1 | 167,01 | 14,1 |
| Плоскость | 20 | 0 | 15 | 32,0 | 0,6 | 0,773 | 515,92 | 18,4 | 588,58 | 19,0 | 70,18 | 29,4 | 150,20 | 22,7 |
| Плоскость | 20 | 0 | 20 | 38,5 | 0,8 | 0,709 | 457,06 | 27,7 | 525,48 | 27,7 | 61,89 | 37,8 | 137,70 | 29,1 |
| Плоскость | 20 | 0 | 25 | 44,1 | 1,0 | 0,650 | 393,67 | 37,7 | 458,62 | 36,9 | 54,64 | 45,1 | 126,22 | 35,0 |
| Плоскость | 20 | 0 | 30 | 48,6 | 1,1 | 0,600 | 339,28 | 46,3 | 401,58 | 44,8 | 48,74 | 51,0 | 116,56 | 40,0 |
| Плоскость | 20 | 0 | 35 | 52,6 | 1,3 | 0,562 | 292,28 | 53,8 | 352,73 | 51,5 | 44,12 | 55,6 | 109,11 | 43,8 |
| Плоскость | 20 | 0 | 40 | 55,8 | 1,5 | 0,528 | 253,86 | 59,8 | 312,50 | 57,0 | 40,21 | 59,6 | 102,44 | 47,3 |
| Плоскость | 20 | 0 | 45 | 58,3 | 1,6 | 0,497 | 226,48 | 64,2 | 283,42 | 61,0 | 36,99 | 62,8 | 96,47 | 50,4 |
| Плоскость | 20 | 0 | 50 | 60,9 | 1,8 | 0,465 | 197,69 | 68,7 | 252,69 | 65,2 | 33,72 | 66,1 | 90,35 | 53,5 |
| Плоскость | 20 | 0 | 55 | 62,5 | 1,9 | 0,450 | 178,35 | 71,8 | 232,79 | 68,0 | 32,04 | 67,8 | 87,41 | 55,0 |
| Плоскость | 20 | 0 | 60 | 64,4 | 2,1 | 0,427 | 159,06 | 74,8 | 211,80 | 70,9 | 29,75 | 70,1 | 82,80 | 57,4 |
| Плоскость | 20 | 0 | 65 | 65,8 | 2,2 | 0,408 | 147,49 | 76,7 | 199,11 | 72,6 | 28,01 | 71,8 | 79,19 | 59,2 |
| Плоскость | 20 | 0 | 70 | 67,4 | 2,4 | 0,390 | 129,22 | 79,6 | 179,70 | 75,3 | 26,22 | 73,6 | 75,65 | 61,1 |
| Плоскость | 20 | 0 | 75 | 68,4 | 2,5 | 0,377 | 117,17 | 81,5 | 166,61 | 77,1 | 25,03 | 74,8 | 73,05 | 62,4 |
| Плоскость | 20 | 0 | 80 | 69,9 | 2,7 | 0,358 | 105,99 | 83,2 | 153,71 | 78,9 | 23,33 | 76,5 | 69,38 | 64,3 |
| Плоскость | 20 | 0 | 100 | 72,8 | 3,2 | 0,319 | 78,24 | 87,6 | 122,86 | 83,1 | 19,91 | 80,0 | 61,87 | 68,2 |

Δ – шаг сетки; H – характерная высота; R – радиус элемента рельефа, $\text{SVF}_{\text{средн}}$ – среднее по территории значение функции закрытости; $V_{\text{средн}}$, $S_{\text{средн}}$, $D_{\text{средн}}$, $E_{\text{средн}}$ – средние по территории значения радиационного баланса, прямой, рассеянной радиации, эффективного излучения, соответственно; $V_{\text{средн}} - V_{\text{плоск}}$, $S_{\text{средн}} - S_{\text{плоск}}$, $D_{\text{средн}} - D_{\text{плоск}}$, $E_{\text{средн}} - E_{\text{плоск}}$ – разницы значений составляющих радиационного баланса на плоской поверхности и на заданном рельефе.

4.2.3 Сравнение роли закрытости и затенения в формировании радиационного баланса территории (на моделях регулярного и случайного рельефа).

Для того, чтобы сравнить степень отдельного влияния закрытости и затенения на значения радиационного баланса участка, были проведены расчеты с отключением одного из факторов. Результаты этих расчетов показаны в таблице 5. Расчет был произведен также для регулярного и случайного рельефа.

В ходе эксперимента были исследованы степени влияния отдельных факторов (затенения и закрытости) на средние значения радиационного баланса и его среднеквадратические отклонения по площади модели. Средние квадратичные отклонения рассчитаны от среднего по площади и характеризуют внутреннюю изменчивость потоков радиации. Они могут быть использованы для оценок репрезентативности значений в отдельных точках с точки зрения воспроизведения среднего по площади значения.

Без учета затенения и закрытости радиационный баланс ($B_{\text{средн}}$) зависит от географических координат, высоты места и угла наклона склона (угла падения солнечных лучей). Средние значения баланса, рассчитанного таким образом, возрастают при уменьшении расчлененности рельефа и на плоскости принимают значение $422,5 \text{ Вт/м}^2$.

Если учитывать закрытость и затенение ($B_{\text{средн}}(\text{SVF}, \text{тень})$) на регулярном рельефе с углами наклона до 30° разница по сравнению с радиационным балансом, рассчитанным без учета данных факторов, колеблется в пределах от $-1,5$ до $1,5\%$. Если не учитывать затенение, значения радиационного баланса становятся больше аналогичного значения, но без учета обоих факторов, на величину до 3% (разница от -3 до 0%). Отдельный учет затенения без учета закрытости ведет к уменьшению потока прямой радиации и, как следствие, к уменьшению значений радиационного баланса. Если учитывать только закрытость горизонта, то при наших условиях высокого солнца радиационный баланс растет. Если учитываются оба фактора, то они в значительной мере компенсируют друг друга.

Если углы наклона достаточно малы, то значения радиационного баланса с учетом всех факторов немного больше, чем аналогичные без учета. Это можно объяснить тем, что при малых углах наклона и достаточно большой высоте солнца влияние затенения практически не проявляется, это показано и в последнем столбце таблицы 5 ($B_{\text{средн}} - B_{\text{средн}}(\text{тень}), \%$), в то время как закрытость уже вносит вклад в изменения эффективного излучения, несколько увеличивая значения баланса. При росте углов наклона знак

разницы сменяется на противоположный, появляются затененные области с малыми значениями радиационного баланса.

Ниже приведены графики, построенные на основе таблицы 5. На рисунках 20, 21 показано, как влияет учет закрытости и затенения на средние значения радиационного баланса в зависимости от различных значений среднеквадратического отклонения для двух расчётных сроков. Видно, что максимальные значения радиационного баланса получены при учете в расчетах только закрытости. Данный факт объясняется заметным уменьшением эффективного излучения, которое не компенсируется за счет других факторов. Минимальные значения появляются, если учитывать в расчетах только затенение. При учете и закрытости, и затенения часть изменений компенсируется противоположным действием данных факторов. Однако средние значения радиационного баланса оказываются заметно меньше значений, полученных при расчетах без учета затенения и закрытости. Кроме того, из рисунков видно, что при закрытости больше 0,95 все кривые практически сливаются в одну, рассматриваемые факторы перестают вносить существенные изменения в средние значения радиационного баланса. На рисунках 23, 24 показано влияние СКО высот рельефа на СКО значений радиационного баланса. Видно, что приведенные на графиках кривые имеют максимумы, причем СКО рельефа, на которых они достигаются зависят от высоты солнца. В 12:30 UT (15:30 по местному солнечному времени) при расчетной высоте солнца 45° СКО радиационного баланса растет при увеличении СКО высот рельефа до 20 м, а в 9:30 при высоте солнца 63° – до 40 м. Такая закономерность появляется только в тех случаях, когда в расчетах участвует затенение и объясняется тем, что после достижения некоторого значения СКО высот рельефа площадь тени оказывается достаточно большой, а угол падения солнечных лучей на большинство элементарных площадок становится сильно отличным от 90° , что приводит к уменьшению максимальных значений радиационного баланса и, соответственно, меньшему различию максимальных и минимальных значений. На кривых, показывающих зависимость СКО значений радиационного баланса, рассчитанных без учета затенения, максимум почти не проявляется, а небольшое уменьшение радиационного баланса при больших СКО рельефа, обуславливается только изменением угла падения солнечных лучей.

Рис. 21. Влияние мезошероховатости на среднее по территории значение радиационного баланса (9:30 UT).

Рис. 22. Влияние мезошероховатости на среднее по территории значение радиационного баланса (12:30 UT).

Рис. 23. Влияние мезошероховатости на СКО радиационного баланса (12:30 UT)

Рис. 24 Влияние мезошероховатости на СКО радиационного баланса (9:30 UT)

Таблица 5. Сравнение роли закрытости и затенения в формировании радиационного баланса территории (на моделях регулярного и случайного рельефа).

| Среднее значение радиационного баланса | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|------|----------|------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------------|---|-------------------------|--|---------------------------------|--|
| Модель | Δ | H, м | R, м | $\alpha, ^\circ$ | $SVF_{\text{средн}}$ | $B_{\text{средн}}$ | $B_{\text{средн}}(SVF, \text{тень})$ | $B_{\text{средн}} - B_{\text{средн}}(SVF, \text{тень}), \%$ | $B_{\text{средн}}(SVF)$ | $B_{\text{ср}} - B_{\text{ср}}(SVF), \%$ | $B_{\text{средн}}(\text{тень})$ | $B_{\text{средн}} - B_{\text{средн}}(\text{тень}), \%$ |
| Время 9:30 (6:30 UT) | | | | | | | | | | | | |
| Гора | 10 | 100 | 100 0 | 5,7 | 0,8837 | 401,85 | 403,31 | -0,4 | 403,31 | -0,4 | 401,85 | 0,0 |
| Гора | 10 | 500 | 100 0 | 26,6 | 0,866 | 350,38 | 346,04 | 1,2 | 359,77 | -2,7 | 336,65 | 3,9 |
| Гора | 20 | 100 | 200 0 | 2,9 | 0,9471 | 406,93 | 407,34 | -0,1 | 407,34 | -0,1 | 406,93 | 0,0 |
| Гора | 20 | 500 | 200 0 | 14,0 | 0,9389 | 379,70 | 384,20 | -1,2 | 378,84 | 0,2 | 385,05 | -1,4 |
| Котловина | 10 | -500 | 100 0 | -26,6 | 0,9863 | 347,20 | 340,87 | 1,8 | 353,24 | -1,7 | 334,83 | 3,6 |
| Котловина | 10 | -100 | 100 0 | -5,7 | 0,9881 | 400,68 | 401,90 | -0,3 | 401,90 | -0,3 | 400,68 | 0,0 |
| Котловина | 20 | -500 | 200 0 | -14,0 | 0,9964 | 375,08 | 377,79 | -0,7 | 378,76 | -1,0 | 374,11 | 0,3 |
| Котловина | 20 | -100 | 200 0 | -2,9 | 0,9968 | 405,65 | 406,00 | -0,1 | 406,00 | -0,1 | 405,65 | 0,0 |
| Время 12:30 (9:30 UT) | | | | | | | | | | | | |
| Гора | 10 | 100 | 100 0 | 5,710 6 | 0,9389 | 622,91 | 624,36 | -0,23 | 624,36 | 0,2 3 | 622,91 | 0,00 |
| Гора | 10 | 500 | 100 | 26,56 | 0,866 | 533,02 | 541,63 | -1,62 | 541,84 | - | 532,81 | 0,04 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----|------|----------|------------|--------|--------|--------|-------|--------|---------------|--------|------|
| | | | 0 | 5 | | | | | | 1,6 6 | | |
| Гора | 20 | 100 | 200 0 | 2,862 4 | 0,9471 | 630,20 | 630,61 | -0,07 | 630,61 | - 0,0 7 | 630,20 | 0,00 |
| Гора | 20 | 500 | 200 0 | 14,03 6 | 0,8837 | 589,69 | 594,88 | -0,88 | 594,88 | - 0,8 8 | 589,69 | 0,00 |
| Котловин а | 10 | -500 | 100 0 | -26,57 | 0,9964 | 530,69 | 535,61 | -0,93 | 535,93 | - 0,9 9 | 530,37 | 0,06 |
| Котловин а | 10 | -100 | 100 0 | -5,711 | 0,9968 | 621,65 | 622,84 | -0,19 | 622,84 | - 0,1 9 | 621,65 | 0,00 |
| Котловин а | 20 | -500 | 200 0 | -14,04 | 0,9881 | 584,89 | 588,29 | -0,58 | 588,29 | - 0,5 8 | 584,89 | 0,00 |
| Котловин а | 20 | -100 | 200 0 | -2,862 | 0,9863 | 628,82 | 629,17 | -0,06 | 629,17 | - 0,0 6 | 628,82 | 0,00 |

| СКО радиационного баланса | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|------|----------|------------------|----------------------|------------------|------------------------------|--|------------------------|--|-------------------------|---|
| Модель | Δ | H, м | R, м | $\alpha, ^\circ$ | SVF _{средн} | В _{СКО} | В _{СКО} (SVF, тень) | В _{СКО} - В _{СКО} (SVF, тень), % | В _{СКО} (SVF) | В _{СКО} - В _{СКО} (SVF), % | В _{СКО} (тень) | В _{СКО} - В _{СКО} (тень), % |
| Время 9:30 (6:30 UT) | | | | | | | | | | | | |
| Гора | 10 | 500 | 100 0 | 26,6 | 0,866 | 187,4 2 | 206,35 | -10,1 | 186,29 | 0,6 | 207,55 | -10,7 |
| Гора | 10 | 100 | 100 0 | 5,7 | 0,8837 | 66,61 | 66,38 | 0,3 | 66,38 | 0,3 | 66,61 | 0,0 |
| Гора | 20 | 500 | 200 0 | 14,0 | 0,9389 | 143,2 7 | 144,73 | -1,0 | 145,88 | -1,8 | 142,14 | 0,8 |
| Гора | 20 | 100 | 200 0 | 2,9 | 0,9471 | 34,31 | 34,28 | 0,1 | 34,28 | 0,1 | 34,31 | 0,0 |
| Котловин а | 10 | -500 | 100 0 | -26,6 | 0,9863 | 181,4 2 | 189,56 | -4,5 | 178,10 | 1,8 | 194,74 | -7,3 |
| Котловин а | 10 | -100 | 100 0 | -5,7 | 0,9881 | 66,04 | 65,69 | 0,5 | 65,69 | 0,5 | 66,04 | 0,0 |
| Котловин а | 20 | -100 | 200 0 | -2,9 | 0,9964 | 34,03 | 33,96 | 0,2 | 33,96 | 0,2 | 34,03 | 0,0 |
| Котловин а | 20 | -500 | 200 0 | -14,0 | 0,9968 | 137,6 2 | 138,47 | -0,6 | 135,71 | 1,4 | 140,47 | -2,1 |
| Время 12:30 (9:30 UT) | | | | | | | | | | | | |
| Гора | 10 | 100 | 100 0 | 5,7106 | 0,9389 | 46,66 | 46,20 | 0,98 | 46,20 | 0,98 | 46,66 | 0,00 |
| Гора | 10 | 500 | 100 0 | 26,565 | 0,866 | 190,3 9 | 189,87 | 0,27 | 189,23 | 0,61 | 191,03 | -0,33 |
| Гора | 20 | 100 | 200 0 | 2,8624 | 0,9471 | 23,12 | 23,06 | 0,26 | 23,06 | 0,26 | 23,12 | 0,00 |
| Гора | 20 | 500 | 200 0 | 14,036 | 0,8837 | 113,7 8 | 111,86 | 1,69 | 111,86 | 1,69 | 113,78 | 0,00 |
| Котловин а | 10 | -500 | 100 0 | -26,57 | 0,9964 | 188,5 7 | 184,79 | 2,01 | 183,85 | 2,50 | 189,52 | -0,50 |
| Котловин а | 10 | -100 | 100 0 | -5,711 | 0,9968 | 46,91 | 46,21 | 1,49 | 46,21 | 1,49 | 46,91 | 0,00 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----|------|----------|--------|--------|------------|--------|------|--------|------|--------|------|
| Котловин а | 20 | -500 | 200 0 | -14,04 | 0,9881 | 114,3 8 | 111,34 | 2,66 | 111,34 | 2,66 | 114,38 | 0,00 |
| Котловин а | 20 | -100 | 200 0 | -2,862 | 0,9863 | 23,29 | 23,16 | 0,59 | 23,16 | 0,59 | 23,29 | 0,00 |

| Среднее значение радиационного баланса | | | | | | | | | | | |
|--|----------|---------------------------|--------|--------------|--------------------|--------------------------------|--|--------------------------|---|-------------------------------|---|
| Модель | Δ | $H_{\text{средн}}$, М | СКО, м | α , ° | $V_{\text{средн}}$ | $V_{\text{средн}}$ (SVF, тень) | $V_{\text{средн}}$ - $V_{\text{средн}}$ (SVF, тень), % | $V_{\text{средн}}$ (SVF) | $V_{\text{средн}}$ - $V_{\text{средн}}$ (SVF, F), % | $V_{\text{средн}}$ (Т ень) | $V_{\text{средн}}$ - $V_{\text{средн}}$ (Тень), % |
| Время 9:30 (6:30 UT) | | | | | | | | | | | |
| Плоскост ь | 2 0 | 0 | 0 | 0 | 408, 12 | 408,12 | 0,0 | 408,12 | 0,0 | 408,12 | 0,0 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 0,5 | 1,3038 | 407, 89 | 407,96 | 0,0 | 407,96 | 0,0 | 407,89 | 0,0 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 1 | 2,5903 | 407, 53 | 407,83 | -0,1 | 407,83 | -0,1 | 407,53 | 0,0 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 5 | 12,461 | 393, 37 | 397,34 | -1,0 | 398,98 | -1,4 | 391,73 | 0,4 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 10 | 23,013 | 359, 54 | 343,20 | 4,5 | 373,08 | -3,8 | 327,97 | 8,8 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 20 | 38,548 | 297, 55 | 231,42 | 22,2 | 320,79 | -7,8 | 204,29 | 31,3 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 40 | 55,755 | 226, 86 | 110,73 | 51,2 | 260,25 | -14,7 | 77,72 | 65,7 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 80 | 69,857 | 175, 27 | 37,94 | 78,4 | 220,18 | -25,6 | -5,78 | 103,3 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 100 | 72,849 | 159, 23 | 27,84 | 82,5 | 208,31 | -30,8 | -21,25 | 113,3 |
| Время 12:30 (9:30 UT) | | | | | | | | | | | |
| Плоскост ь | 2 0 | 0 | 0 | 0 | 632, 14 | 632,14 | 0,00 | 632,14 | 0,00 | 632,14 | 0,00 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 0,5 | 1,3038 | 631, 89 | 631,97 | -0,01 | 631,97 | -0,01 | 631,89 | 0,00 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 1 | 2,5903 | 631, 28 | 631,58 | -0,05 | 631,58 | -0,05 | 631,28 | 0,00 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 5 | 12,461 | 611, 34 | 616,88 | -0,91 | 616,88 | -0,91 | 611,34 | 0,00 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 10 | 23,013 | 561, 35 | 576,46 | -2,69 | 574,54 | -2,35 | 560,41 | 0,17 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------|--------|---|-----|--------|------------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Плоскость | 2 0 | 0 | 20 | 38,548 | 456, 37 | 457,06 | -0,15 | 478,46 | -4,84 | 425,91 | 6,67 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 40 | 55,755 | 309, 20 | 253,86 | 17,90 | 340,32 | -10,06 | 223,09 | 27,85 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 80 | 69,857 | 188, 49 | 105,99 | 43,77 | 230,35 | -22,20 | 67,56 | 64,16 |
| Плоскость | 2 0 | 0 | 100 | 72,849 | 159, 40 | 78,24 | 50,92 | 205,31 | -28,80 | 32,33 | 79,72 |

| СКО радиационного баланса | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------|---------------------------|-----------|--------------|----------------------|--------------------------------|---|-----------------------|---|-------------------------------|--|
| Модель | Δ | $H_{\text{средн}}$, м | СКО, м | α , ° | $SVF_{\text{средн}}$ | $V_{\text{СКО}}(SVF,$ тень) | $V_{\text{СКО}} -$ $V_{\text{СКО}}(SVF,$ тень), % | $V_{\text{СКО}}(SVF)$ | $V_{\text{СКО}} -$ $V_{\text{СКО}}$ (SVF), % | $V_{\text{СКО}}(\text{тень})$ | $V_{\text{СКО}} -$ $V_{\text{СКО}}(\text{тен}$ ь), % |
| Время 9:30 (6:30 UT) | | | | | | | | | | | |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 0 | 0 | 1,000 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 0,0 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 0,5 | 1,3038 | 0,999 | 10,16 | 0,0 | 10,16 | 0,0 | 10,16 | 0,0 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 1 | 2,5903 | 0,997 | 20,53 | 0,0 | 20,53 | 0,0 | 20,52 | 0,0 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 5 | 12,461 | 0,947 | 100,33 | -4,7 | 96,06 | - 0,3 | 100,54 | -5,0 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 10 | 23,013 | 0,860 | 203,51 | -17,2 | 174,46 | - 0,5 | 210,88 | -21,5 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 20 | 38,548 | 0,709 | 269,45 | -9,2 | 248,41 | - 0,7 | 279,15 | -13,2 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 40 | 55,755 | 0,528 | 249,32 | 9,7 | 278,71 | - 0,9 | 261,49 | 5,3 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 80 | 69,857 | 0,358 | 187,19 | 31,3 | 274,90 | - 0,9 | 204,00 | 25,1 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 100 | 72,849 | 0,319 | 173,09 | 35,3 | 270,37 | - 1,1 | 186,89 | 30,1 |
| Время 12:30 (9:30 UT) | | | | | | | | | | | |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 0 | 0 | 1,000 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 0,0 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 0,5 | 1,3038 | 0,999 | 6,85 | -0,06 | 6,85 | - 0,0 6 | 6,85 | 0,00 |
| Плоскост | 20 | 0 | 1 | 2,5903 | 0,997 | 13,53 | -0,11 | 13,53 | - | 13,52 | 0,00 |

| | | | | | | | | | | | |
|---------------|----|---|-----|--------|-------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| ь | | | | | | | | | 0,1 1 | | |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 5 | 12,461 | 0,947 | 67,03 | -0,71 | 67,03 | - 0,7 1 | 66,56 | 0,00 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 10 | 23,013 | 0,860 | 128,64 | -0,39 | 129,58 | - 1,1 2 | 131,14 | -2,34 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 20 | 38,548 | 0,709 | 232,34 | -16,08 | 203,67 | - 1,7 6 | 238,50 | -19,16 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 40 | 55,755 | 0,528 | 271,97 | -9,76 | 252,82 | - 2,0 3 | 279,83 | -12,93 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 80 | 69,857 | 0,358 | 216,53 | 9,44 | 243,80 | - 1,9 7 | 229,55 | 3,99 |
| Плоскост ь | 20 | 0 | 100 | 72,849 | 0,319 | 194,13 | 16,14 | 235,96 | - 1,9 3 | 206,93 | 10,61 |

Δ – шаг сетки; H – характерная высота; $V_{\text{средн}}$ – среднее по территории значение радиационного баланса; $V_{\text{средн}} - V_{\text{средн}}(\text{SVF, тень})$ – отношение среднего значения радиационного баланса с учетом закрытости и затенения к аналогичному без учета обоих факторов, $V_{\text{средн}} - V_{\text{средн}}(\text{SVF})$ – отношение среднего значения радиационного баланса с учетом закрытости к аналогичному без учета обоих факторов, $V_{\text{средн}} - V_{\text{средн}}(\text{тень})$ – отношение среднего значения радиационного баланса с учетом затенения к аналогичному без учета обоих факторов.

Глава 5. Выводы

В ходе выполнения настоящей работы были произведены расчеты значений составляющих радиационного баланса для моделей регулярного и случайного рельефа и изучена роль функции закрытости в их формировании.

Основываясь на результатах, приведенных в предыдущей главе, можно сделать следующие выводы:

1. $SVF > 0,9$ не оказывает существенного влияния на радиационный баланс. Местность с таким характерным значением функции закрытости можно считать открытой и не учитывать в расчетах радиационного баланса данную характеристику.
2. Средняя по территории функция закрытости практически линейно зависит от тангенса характерного угла наклона склона.
3. Осредненные по участку значения потоков радиации, составляющих радиационный баланс участка, закономерно меняются в зависимости от среднего значения SVF участка:
 - 3.1. Рассеянная радиация линейно убывает, по мере уменьшения значения SVF , т.е. с ростом закрытости участка.
 - 3.2. Эффективное излучение также линейно убывает с ростом закрытости, но в силу того, что температура воздуха также убывает с высотой, независимо от SVF , эффективное излучение убывает с несколько большей скоростью, чем рассеянная радиация
 - 3.3. Значение средней по участку прямой радиации убывают с ростом закрытости наиболее сильно. Темп убывания ослабевает, по мере приближения SVF к единице, так что при значениях SVF больших 0,95 участок можно считать гладким и влиянием закрытости в расчетах потоков радиации пренебречь
4. Учет в расчетах только влияния затенения приводит к уменьшению радиационного баланса по сравнению со значением, полученным без учета влияния рельефа. Учет только закрытости показывает обратные результаты, т.е. увеличение баланса. Учет в расчетах обоих факторов дает уменьшение значений радиационного

баланса, однако часть влияния затенения компенсируется обратным влиянием закрытости.

5. Если рассматривать функцию закрытости, как случайную величину – характеристику случайного поля рельефа, хорошей ее аппроксимацией будет beta распределение, параметры которого можно подобрать исходя из оценок среднего и СКО.

6. Зависимости рассеянной радиации и эффективного излучения от функции закрытости универсально применимы для всех сроков наблюдения.

7. Зависимость прямой солнечной радиации от функции закрытости меняется от срока к сроку под влиянием изменения затенения.

8. В результате изменчивости зависимости прямой радиации от функции закрытости меняется от срока к сроку и зависимость от функции закрытости радиационного баланса.

9. Однако для разных сроков зависимость среднего по участку радиационного баланса от средней по участку прямой солнечной радиации остается линейной (со слабо меняющимся наклоном и существенно меняющимся постоянным коэффициентом)

10. Следовательно, можно сделать важный для практического оценивания радиационного баланса на ландшафтных участках типа урочища вывод о том, что если известны составляющие радиационного баланса на горизонтальную поверхность для рассматриваемого срока и географических координат и рассчитана заранее средняя функция закрытости рассматриваемого участка, то можно, используя полученные зависимости, оценить среднее значение всех составляющих радиационного баланса на рассматриваемом участке пересеченной местности.

11. Среднее значение функции закрытости заданного участка можно приближенно оценить, используя полученную зависимость этой величины от СКО высот участка или среднее значение градиента высот рельефа.

Заключение

В данной работе представлено исследование влияние функции закрытости на радиационный баланс пересеченной местности. В процессе его выполнения был осуществлен ряд экспериментов по расчету составляющих радиационного баланса. Все расчеты производились на основе начальных метеорологических данных и цифровой модели рельефа местности. Для исследования были созданы различные модели пересеченной местности: гладкие регулярные формы с переменными параметрами и формы с шероховатостью различного масштаба, что позволило рассмотреть функцию закрытости и как детерминированную, и как случайную величину.

На основе полученных результатов (глава 4) были сделаны важные и интересные выводы, представленные в главе 5, которые позволяют сказать, что функция закрытости является важным фактором формирования радиационного баланса пересеченной местности. Полученные, практически линейные, зависимости его составляющих от средней по территории закрытости помогут в дальнейшем упростить расчет по средствам введения поправочных множителей на рельеф местности. Кроме того, результатом исследования стала оценка функции распределения закрытости рельефа, представленного случайной шероховатостью. Ее аппроксимация beta распределением поможет восстановить значения функции закрытости по территории.

Литература

- 1) Братсерт У.Х. Испарение в атмосферу Л.: Гидрометиздат. 1985
- 2) Кондратьев К.Я., Подольская Э.Л. Эффективное излучение склонов // Изв. АН СССР. Сер.Геофиз. Вып.4. 1953. С.370-375.
- 3) Кондратьев К.Я. Актинометрия. Л.: Гидромет.Издат, 1965. 691 с.
- 4) Русин И.Н., Пикалева А.А. Влияние затенения на радиационный баланс горного ледника // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Вып.2. 2012. С. 81-93.
- 5) Русин И.Н., Бельмас Н.А. Оценка закрытости горизонта при расчете радиационного баланса пересеченной местности// Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. Геология.География. Вып.1. 2016. С. 103-115.
- 6) Barring L., Mattsson J. O. & Lindqvist S. Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmo, Sweden // Journal of Climatology. 1985. Vol. 5. P. 433–444.
- 7) Bourbia F., Boucheriba F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine) // Renewable Energy vol. 35, 2008, 343-347 pp.
- 8) Carrasco-Hernandez R., Smedley A.R.D., Webb A. R. Using urban canyon geometries obtained from Google Street View for atmospheric studies: Potential applications in the calculation of street level total shortwave irradiances // Energy and Buildings, vol. 86, 2015, 340–348 pp.
- 9) Chapman L., Thornes J.E., Bradley A.V. Sky-view factor approximation using GPS receivers // International Journal of Climatology, vol. 22, 2002, 615–621 pp.
- 10) Corripio J. G. Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from DEMs and solar radiation modeling in mountainous terrain // J. Geographical Information Science, vol. 17, № 1, 2003, 1–23 pp.
- 11) Dozier J, Bruno J. A Faster Solution to the Horizon Problem // Computers & Geosciences Vol. 7, 1981, 145-151 pp.
- 12) Dozier J., Outcalt S. I. An Approach toward Energy Balance Simulation over Rugged Terrain // Ohio State University Press Geographical Analysis, vol. 11, №1, 1979, 65-85 pp.
- 13) Gal T, Lindberg F, Unger J. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate // Theoretical and Applied Climatology, vol. 95, 2009, 111–123 pp.

- 14) Giridharan R., Ganesan S., Lau S.S.Y. Daytime urban heat island effect in high-rise high-density developments in Hong-Kong // *Energy and Building*, vol. 36, № 6, 2004, 525 – 534 pp.
- 15) Grimmond C.S.B., Potter S.K., Zutter H.N., Souch C. Rapid Methods to Estimate Sky-View Factors Applied to Urban Areas // *Int. J. Climatol.* № 21, 2001, 903–913 pp.
- 16) Hapman L. C, Thornes J. E. Real-Time Sky-View Factor Calculation and Approximation // *US Journal of atmospheric and oceanic technology*, vol. 21, 2003, 730–741 pp.
- 17) He X., Miao S., Shen S., Li J., Zhang B., Zhang Z., Chen X. Influence of sky view factor on outdoor thermal environment and physiological equivalent temperature // *Int. J. Biometeorol.* vol. 59, 2015, 285–297 pp.
- 18) Helbig N., and Löwe H. Shortwave radiation parameterization scheme for subgrid topography // *J. Geophys. Res.*, vol. 117, 2012
- 19) Holmer B. A simple operative method for determination of sky view factors in complex urban canyons from fisheye photographs // *Meteorol. Zeitschrift.* 1992. N.F. 1. P. 236–239.
- 20) Holmer B., Postgard U., Eriksson M. Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI // *Theor. Appl. Climatol.* № 68, 2001, 33–40 pp.
- 21) Johnson G.T., Watson J.D. The determination of view-factors in urban canyons // *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 23, 1984, 329–335 pp.
- 22) Marks D. and Dozier J. A Clear-Sky Longwave Radiation Model for Remote Alpine Areas // *Arch. Met. Geoph. Biokl. Set. B*, 27, 1979, 159-187 pp.
- 23) Noori K. A., Nobuo M. The sky view factor effect on the microclimate of a city environment: a case study of Dhaka City // *The seventh International Conference on Urban Climate 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan*
- 24) Oke T.R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations // *J. Climatol.* № 1, 1981, 237-254 pp.
- 25) Oke T.R. *Boundary layer climates* II edition. London. 1987. P.436.
- 26) Psiloglou B. E., Kambezidis H. D. Performance of the meteorological radiation model during the solar eclipse of 29 March 2006 // *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, European Geosciences Union (EGU)*, vol. 7, № 4, 2007, 12807-12843 pp.

- 27) Reifsnyder W. E., Lull H. W. Radiant Energy in Relation to Forests // US. ForestService, U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin № 1344, 1965, 111 pp.
- 28) Scarano M., Sobrino J.A. On the relationship between the sky view factor and the land surface temperature derived by Landsat-8 images in Bari, Italy // International Journal of Remote Sensing, vol 36, 2015, 4820-4835 pp.
- 29) Steyn D.G., Hay J.E., Watson I.D., Johnson G.T. The Determination of sky view-factor in urban environments using video imagery // US Journal of atmospheric and oceanic technology, vol. 3, 1986, 759–764 pp.
- 30) Svensson M. K. Sky view factor analysis-implications for urban air temperature differences // Meteorological Application vol.11, 2004, 201–211 pp.
- 31) Unger, J. Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database // Int. J. Environment and Pollution. 2009. Vol. 36. Nos. 1/2/3. P.59–80.
- 32) Watson I.D., Johnson G.T. Graphical estimation of sky view-factors in urban environments // Journal of Climatology, vol. 7, 1987, 193–197 pp.

Приложение 1. Блок-схема программы расчета радиационного баланса

Модуль 1. Расчет значений функции закрытости (SVF)

Модуль 2. Расчет угла наклона и азимута склона.

Модуль 3. Расчет затенения.

Модуль 4. Расчет значений составляющих радиационного баланса.