

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В.ЛОМОНОСОВА

Географический факультет

О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.В. Киселева,
Ю.Г. Коломиец, Н.В. Лисицкая

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ
ДЛЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ
(БАЗА КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ)

Учебное пособие

Москва – 2010

УДК 620.97; 528.9.004

ББК

В 64

В 64 Климатические данные для возобновляемой энергетики России (база климатических данных): Учебное пособие. – М.: Изд-во МФТИ, 2010. – 56 с.)

ISBN 978-5-89-155-194-7

В предлагаемом учебном пособии рассматриваются существующие источники климатической информации для оценки ресурсов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и расчета эффективности работы установок на ВИЭ. Приведены характеристики современных баз данных климатической информации и подробно рассмотрены процедуры их верификации. Представлена созданная на основе базы данных NASA SSE электронная база данных климатологической информации для различных регионов России, включающая данные о солнечной радиации, приходящей на различным образом ориентированные в пространстве неподвижные поверхности и на следящую за Солнцем поверхность, о скоростях ветра на высотах 10 и 50 м, температуре окружающей среды и относительной влажности воздуха для ячеек территории с размерами $1^\circ \times 1^\circ$ широты и долготы, а также средние многолетние данные большого числа наземных метеостанций.

Пособие предназначено для студентов экологических специальностей географических факультетов университетов, а также студентов технических вузов, специализирующихся в области возобновляемой и нетрадиционной энергетики.

*Одобрено Секцией физико-технических проблем энергетики ученого совета
Объединенного института высоких температур РАН и Ученым советом
географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова*

Рецензенты:

Д.г.н. Клиге Р.К., к.т.н. Николаев В.Г.

ISBN 978-5-89-155-194-7 © ОИВТ РАН, 2010

© Географический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Актинометрические данные как основа для оценки ресурсов солнечной энергии	11
1.1. Некоторые особенности распространения солнечного излучения в атмосфере	13
1.2. Комплекс стандартных актинометрических наблюдений	16
1.3. Проблемы определения гелиоэнергетических ресурсов территорий на основе наземных измерений. Характеристики временной и пространственной изменчивости падающей солнечной радиации.	19
1.3.1. Характеристики временной структуры рядов солнечной радиации	20
1.3.2. Пространственная корреляция сумм солнечной радиации.....	23
Глава 2. Принципы построения базы данных NASA	31
2.1. Базы данных как источники актинометрической информации для проектирования солнечных и ветровых установок	31
2.2. База климатологических данных NASA Surface meteorology and Solar Energy: методы получения и представления данных	34
2.3. Методы расчета плотности потока падающей солнечной радиации на горизонтальную и наклонную поверхность, выбор регионов, сходных по климатическим условиям	37
2.4. Сравнение актинометрических данных NASA с данными наземных измерений для территории России	40
Глава 3. Электронная база климатической информации для территории Российской Федерации.....	46
3.1 Описание электронной базы климатической информации для территории Российской Федерации.....	46
3.2. Описание структуры базы климатической информации для территории России.....	50
Заключение	54
Литература	55

Введение

Освоение экологически чистых возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является стратегической задачей, определяющей перспективы устойчивого развития многих стран, и прежде всего, удаленных от сетей централизованного энергоснабжения регионов, в условиях постепенного истощения дешевых запасов ископаемого органического топлива и угрозы все большего антропогенного загрязнения окружающей среды. Многие технологии использования ВИЭ уже сегодня достигли уровня конкурентоспособности и постепенно выходят на рынок, в том числе и российский. Солнечная и ветровая энергия все шире используются для производства электроэнергии, нагрева различных теплоносителей и других энергетических приложений. Точный учет влияния солнечного излучения и ветра на освещенность и энергетический баланс зданий и сооружений является основой бурно развивающейся энергосберегающей и так называемой «солнечной» архитектуры.

Среди ВИЭ лидирующее положение занимает солнечная энергия. Суммарный поток энергии солнечного излучения, поступающий на поверхность Земли, во много раз превышает мощность действующих в мире энергоустановок, а располагаемые ресурсы солнечной энергии на территориях всех стран, в том числе расположенных в высоких широтах, существенно превышают их энергетические потребности на обозримую перспективу. Большинство других возобновляемых источников энергии – ветер, растительная биомасса, водные потоки и волны – имеют солнечное происхождение: возникновение потоков воздушных масс и кругооборот атмосферной влаги обусловлены неравномерностью нагрева поверхности Земли солнечным излучением, а основой роста растений является фотосинтез.

Солнечная энергия доступна повсеместно. Солнечное излучение исходит от источника с яркостной температурой около 6000°C и с термодинамической точки зрения является высококачественным первичным источником энергии, допускающим принципиальную возможность его преобразования в другие виды энергии (электроэнергию, тепло, холод и др.) с высоким КПД. Однако существенными недостатками солнечной энергии являются ее нестабильность (суточная, сезонная, погодная) и относительно малая плотность энергетического потока (за пределами атмосферы – около $1,4 \text{ кВт/м}^2$, на земной поверхности в ясный полдень – около 1 кВт/м^2 , а в среднем за год (с учетом ночей и облачности) – от $0,15$ до

0,25 кВт/м², что, тем не менее, соответствует ежегодному поступлению на 1 м² земной поверхности энергии, эквивалентной 150...250 кг у.т.¹).

Ветроэнергетический поток также весьма нестабилен. Располагаемая мощность ветрового потока пропорциональна кубу скорости ветра, что обуславливает чрезвычайно высокую чувствительность производительности ветроэнергетических установок к условиям места их расположения. При скорости ветра 10 м/с удельная мощность ветрового потока составляет около 100 Вт в расчете на 1 м² ометаемой лопастями ветроустановки площади, а при скорости 5 м/с эта мощность оказывается меньше в 8 раз. Для сравнения отметим, что удельные энергопотоки в современных энергетических установках достигают сотен кВт/м².

Такие особенности солнечного излучения и ветра как первичных источников энергии затрудняют создание эффективных энергетических устройств, поскольку обуславливают необходимость сооружения приемников солнечного излучения и ветроколес большой площади, а также использования аккумуляторов энергии. В результате, несмотря на бесплатность самих источников энергии, стоимость солнечных и ветровых установок оказывается значительной, что снижает их конкурентоспособность по отношению к традиционным энергоустановкам, особенно если последние используют дешевое органическое топливо. В этой ситуации надежность исходных данных о располагаемых ресурсах солнечной и ветровой энергии является одним из определяющих факторов энергетической и экономической эффективности разработки и практического использования таких установок. Для России с ее громадной территорией и широким набором климатических зон достоверная оценка потенциала солнечной и ветровой энергии в конкретном географическом районе является крайне важной задачей. Только в случае ее решения разработчики и потребители солнечных и ветровых установок будут иметь информацию об эффективности работы оборудования, продолжительности его функционирования в течение года, сроках окупаемости, необходимости установки аккумуляторов, дублирующих мощностей и т.д.

На территории СССР была создана одна из самых разветвленных в мире сетей метеорологических станций, на которых проводились регулярные актинометрические наблюдения (рис.1). Была разработана единая программа и методика обработки и обобщения актинометрической информации, создающая основу для агроклиматического районирования

¹ 1 кг у.т. = 7 Мкал ≈ 29 МДж

территории страны, строительного проектирования, оценки изменения климата и других хозяйственных и научных целей [Научно-прикладной справочник..., 1990]. В настоящее время число российских метеостанций, ведущих регулярные измерения интенсивности солнечной радиации² – менее 130, причем их распределение по территории страны неравномерно, что не отвечает современным потребностям в оценке ресурсов и не обеспечивает возможности надежного расчета показателей разрабатываемых установок. Нетрудно подсчитать, что при площади территории России 17 млн км² среднее расстояние между метеостанциями составляет около 500 км, а с учетом неравномерной плотности их размещения среднее расстояние между станциями в азиатской части России достигает 1000 км. В то же время, по результатам исследований ведущего Российского научного центра в области актинометрии – ГГО им. А.И. Воейкова, – данные измерений с приемлемой погрешностью могут экстраполироваться на расстояние не более 130 км от метеостанции. Ясно, что для получения надежных данных о поступлении энергии солнечного излучения для большей части территории страны имеющаяся в настоящее время сеть метеостанций явно недостаточна.

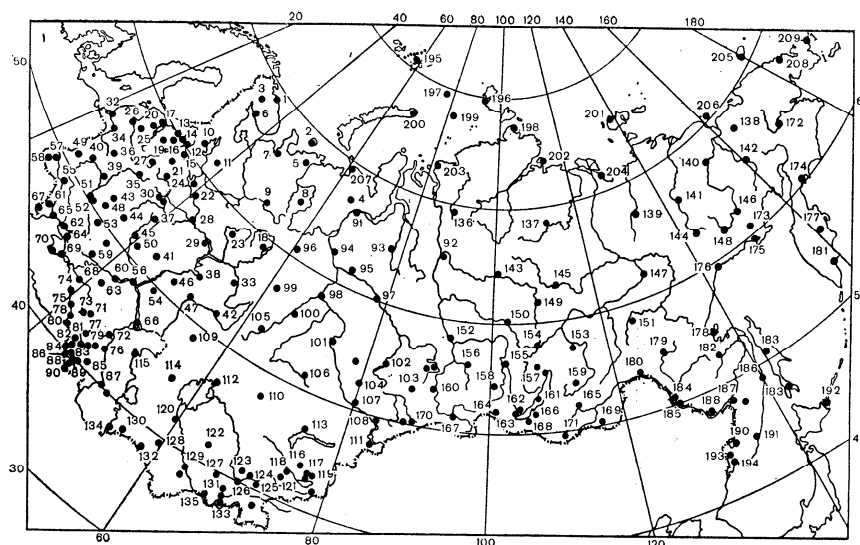


Рис. 1. Пункты актинометрических наблюдений СССР [Пивоварова, Стадник, 1988]

В данном учебном пособии изложены современные методы получения данных о распределении сумм падающего солнечного излучения на территории России, осредненных по различным временным периодам, с учетом требований гелиотехнических разработок. Наряду с данными прямых

² Далее в тексте термин «солнечная радиация» будет употребляться наряду с термином «солнечная энергия», и оба они имеют смысл «энергия солнечного излучения».

многолетних измерений солнечной радиации на российских метеостанциях, обобщенными в [*Научно-прикладной справочник...*, 1990] и ряде известных баз данных (Meteonorm, RetScreen), для обеспечения более плотного покрытия территории России оправданным является использование базы данных Национального агентства по авиационной и исследованию космического пространства США «NASA Surface meteorology and Solar Energy» (NASA SSE) [*The NASA Surface Meteorology...*, 2007]. Она создана на основе многолетних спутниковых измерений радиационного баланса поверхности земного шара (включая территорию России) и современных моделей распространения излучения в атмосфере, учитывающих альбедо земной поверхности, структуру облачности, влажность воздуха, содержание в атмосфере различных аэрозолей и ряда других факторов. Как показал анализ полученного массива информации, выполненный применительно к территории США и ряду других регионов земного шара, эти данные позволяют с достаточно невысокой погрешностью определять средние потоки солнечного излучения для участков земной поверхности с географическим разрешением $1^\circ \times 1^\circ$.

Пользуясь преимуществами, связанными с существованием современных источников данных, следует принимать во внимание необходимость проведения их верификации с использованием данных метеостанций России. Результаты такого сравнения позволяют выбрать основу как для расчетов потенциала территорий, так и картографирования его элементов. Как следует из описания методологии формирования базы данных NASA SSE [<http://eosweb.larc.nasa.gov>] при «подгонке» результатов расчетов к данным наземных измерений разработчики воспользовались достаточно обширным массивом данных метеостанций, однако среди них было только 6 российских станций. Учитывая значительность территории России, а также высокоширотное расположение большей ее части, верификация данных для этой территории приобретает особое значение³. В учебном пособии показаны способы проведения и результаты оценки погрешности: данные NASA SSE сравнивались с прямыми многолетними измерениями солнечной радиации для разных периодов года на 50 метеостанциях России, расположенных в различных регионах страны. Более детальные сравнительные исследования были выполнены с использованием многолетних измерений солнечной радиации в метеорологической обсер-

³ Согласно упомянутой методологии, ошибки определения актинометрических и метеорологических параметров возрастают в направлении к полюсам.

ватории МГУ имени М.В. Ломоносова, а также на метеостанциях Южного федерального округа России. Показано, что погрешность данных NASA SSE по средним суммам солнечной радиации для большинства регионов России не превышает 15%, что для инженерных расчетов эффективности солнечных установок вполне приемлемо.

Информация по суммарной солнечной радиации важна при разработке преобразователей энергии солнечного излучения, не использующих оптические концентраторы (плоские и вакуумированные солнечные коллекторы для нагрева воды, воздуха и других теплоносителей, фотоэлектрические преобразователи без концентраторов и др.). Данные о прямой солнечной радиации необходимы при разработке установок с концентраторами солнечного излучения (фотоэлектрические преобразователи, солнечные электростанции и энергоустановки на основе параболоцилиндрических, параболоидных и других типов концентраторов, электростанции башенного типа с гелиостатами и др.).

В базу данных NASA SSE включены также значения среднегодовых скоростей ветра на высотах от 10 до 300 м для различных условий подстилающей поверхности. Эти данные позволяют получить наглядное представление о районах с наибольшими средними скоростями ветра и могут быть использованы на начальных этапах оценки эффективности ветроустановок, работающих как самостоятельно, так и в составе комбинированных солнечно-ветровых энергокомплексов. Следует, однако, иметь в виду, что в отличие от солнечной радиации истинные значения скорости ветра существенно зависят от локальных географических условий, и представленная в базе данных информация требует подтверждения путем организации прямых измерений скорости ветра в предполагаемом месте эксплуатации ветроустановок или сравнения с многолетними данными ближайших метеостанций.

В целом, новые методы получения информации обеспечивают разработчиков и потребителей солнечных и ветровых установок исходными данными для оценки потенциала солнечной энергии и энергии ветра в различных географических регионах России, проведения оптимизационных расчетных исследований и подготовки предпроектных обоснований эффективности использования этих источников энергии.

На основе базы данных NASA SSE была создана локальная электронная база данных климатологической информации для различных регионов России, включающая данные по солнечной радиации, приходящей на

различным образом ориентированные в пространстве неподвижные поверхности и на следящую за Солнцем поверхность, по скоростям ветра на высотах 10 и 50 м, по температуре окружающей среды и относительной влажности воздуха для ячеек территории с размерами $1^\circ \times 1^\circ$ широты и долготы, а также многолетние усредненные данные конкретных метеостанций. В учебном пособии приведено описание структуры этой базы данных и руководство по работе с ней (CD с дистрибутивом к учебному пособию прилагается).

Глава 1. Актинометрические данные как основа для оценки ресурсов солнечной энергии

Эффективность практического использования солнечной и ветровой энергии во многом зависит от того, насколько точно при проектных разработках были учтены закономерности и конкретные данные о приходе солнечной радиации и скорости ветра в месте предполагаемой эксплуатации установок. Создание минимальных по стоимости и конкурентоспособных солнечных и ветровых установок, эффективно удовлетворяющих потребности пользователя, связано с обоснованием оптимальной площади солнечных приемников, установленной мощности и типа ветроустановки и емкости аккумулятора энергии. Из-за относительно малых плотностей энергетических потоков солнечного излучения и ветра у поверхности земли площадь приемников этих первичных источников энергии может быть так велика, что это вносит определяющий вклад в стоимость всей установки. Нестабильность поступления первичной энергии обуславливает необходимость снабжения установок аккумуляторами энергии, выбор емкости которых оказывает влияние как на необходимый для работы установки размер приемников, так и на мощность резервного источника энергии, а, следовательно, и на технико-экономические показатели установки в целом.

В общем случае информация о потоках солнечной радиации и суммарной падающей энергии может быть получена следующими способами:

- аналитическим, когда необходимые параметры для конкретной географической точки определяются расчетным путем;
- непосредственными (обычно непродолжительными) измерениями на месте;
- многолетними измерениями по единой методике на метеостанциях, результаты которых аккумулированы в климатических справочниках и электронных базах данных.

Аналитические способы определения значений солнечной радиации для предварительной оценки потенциала отдельных регионов применимы, однако они сложны, точность их невысока, и в этой связи они могут иметь при проектировании гелиоустановок лишь оценочное значение [*Расчет ресурсов...*, 1998].

Непосредственные измерения плотности потока солнечного излучения (и скорости ветра – ветромониторинг) в месте предполагаемого создания

установок сопряжены с определенными организационными сложностями. Кроме того, для статистически оправданных оценок такие измерения должны быть многолетними.

Основным источником исходной актинометрической информации, таким образом, являются климатические справочники и базы данных, создаваемые специализированными организациями на основе обработки результатов многолетних метеорологических наблюдений на метеостанциях. В СССР основными источниками актинометрических данных для специалистов-гелитотехников являлись многотомные справочники по климату СССР, ставшие результатом труда многочисленных коллективов региональных и центральных организаций, занимающихся проблемами метеорологии и климата [*Справочник по климату...*, 1967; *Научно-прикладной справочник...*, 1990]. Как отмечалось выше, в России при достаточно разветвленной сети метеорологических станций количество метеостанций, ведущих актинометрические измерения, весьма ограничено. Так, по данным ГГО им. А.И. Воейкова, в 1997 г. на территории России действовало 129 актинометрических станций, однако далеко не все результаты их измерений были обобщены в упомянутых выше климатических справочниках. Малая плотность размещения существующих в России актинометрических станций осложняет получение надежных данных о распределении солнечной радиации по территории страны. Тем не менее, такая работа ГГО в 1990-х годах была выполнена и реализована в подготовленных Атласах ветрового и солнечного климатов России, включающих в себя и карты распределения солнечной радиации [*Борисенко, Стадник, 1997*].

В СССР работы по составлению Атласа гелиоэнергетических ресурсов страны проводились, начиная с 1920-х гг. [*Атлас, 1935*]. При этом уже в ранних работах отмечалось, что «невозможно раз и навсегда составить солнечный кадастр той или иной территории как в смысле общих количеств получаемой ею ежегодно солнечной радиации, так и в смысле пространственного распределения этих количеств. Это связано, во-первых, с изменением количества и качества наблюдательного материала, положенного в основу кадастра на определенный год, и, во-вторых, с прогрессом техники использования солнечной энергии». Поэтому при решении проблем внедрения возобновляемых источников энергии и рационального природопользования вопросы определения потенциала ресурсов солнечной энергии для территорий России продолжают оставаться важными.

1.1. Некоторые особенности распространения солнечного излучения в атмосфере

Напомним основные характеристики солнечного излучения, которые необходимо учитывать при оценке его энергетического потенциала и создании установок, преобразующих энергию Солнца. Как известно, количество солнечной радиации, поступающее в единицу времени на поверхность за пределами атмосферы, перпендикулярную лучам, при среднем расстоянии Земли от Солнца называется солнечной постоянной и равно $I_0 = 1,395 \text{ кВт/м}^2$. Спектральное распределение лучистой энергии Солнца, не искаженное влиянием атмосферы, представлено на рис. 2. Земля движется вокруг Солнца по эллиптической орбите, поэтому приход солнечной энергии в течение года меняется от $1,349 \text{ кВт/м}^2$ (в начале июля) до $1,443 \text{ кВт/м}^2$ (в начале января).

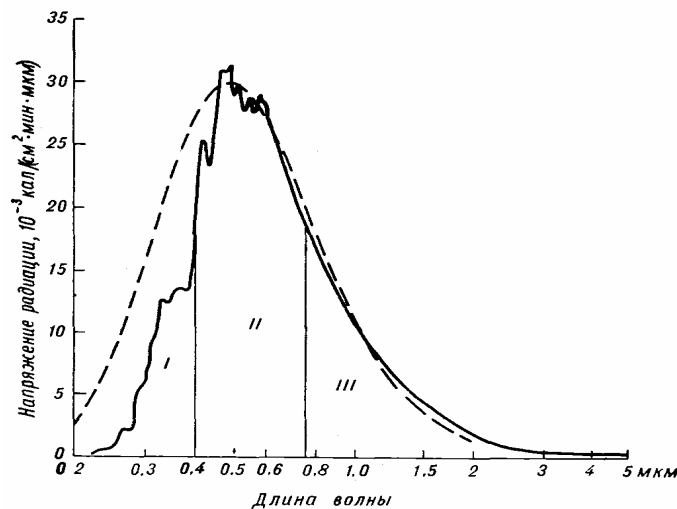


Рис. 2. Распределение энергии в спектре Солнца и в спектре черного тела при 6000°K (пунктир) [Хргуан, 1978]

Если на поверхность Земли солнечные лучи падают под углом θ_z к вертикали (зенитный угол), то на 1 м^2 за 1 с поступает поток энергии

$$I' = I_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_z, \quad (1)$$

где r_0/r — отношение среднего радиуса земной орбиты к текущему расстоянию от Земли до Солнца. Величину I' называют инсоляцией, или прямой солнечной радиацией. Поскольку $\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$, где φ — широта местности, δ — склонение, а ω — часовой угол Солнца, то для заданного ω можно получить I' в любой момент дня. Интегрируя (1) по времени от восхода ($\omega = -\omega_0$) до

заката ($\omega = \omega_0$) Солнца и считая, что в течение дня $\delta = const$, можно получить суточную сумму поступающего потока энергии:

$$W = I_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \frac{\tau}{\pi} [\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0], \quad (2)$$

где τ – продолжительность дня от восхода Солнца до заката. На экваторе $\varphi = 0$, $\omega_0 = \pi/2$, и от выражения в квадратных скобках в (2) остается лишь $\cos \delta$. Максимум суточной суммы солнечного излучения приходится на экваторе на дни равноденствий ($\delta = 0$), минимум – солнцестояний ($\delta = \pm 23^\circ 30'$). С удалением от экватора весенний максимум W наблюдается всё позднее, осенний – всё раньше, и при $\varphi \approx 15^\circ$ они сливаются в один летний максимум. По мере продвижения к полюсу разница между летними и зимними дневными суммами приходящей солнечной энергии становится всё существеннее. Соответственно, усиливается и годовой ход температуры, следующий за ходом радиации. При $|\varphi| \geq 66^\circ 33'$ (за полярным кругом) Земля зимой подолгу вовсе не получает солнечной энергии (полярная ночь), в то время как летом из-за длинного дня, достигающего полных суток (полярный день) W там больше, чем на экваторе.

На количество солнечной энергии, попадающей на земную поверхность, естественно влияет наличие у Земли атмосферы. В результате прохождения в атмосфере интенсивность солнечного излучения постепенно уменьшается. Это происходит, во-первых, за счет рассеяния света молекулами газов, пылинками, аэрозолями и пр. При этом в атмосфере появляется рассеянная радиация, часть которой уходит обратно в мировое пространство. Во-вторых, существует поглощение солнечного излучения озоном (в верхних слоях атмосферы), водяным паром, углекислотой и кислородом (в более низких). В разных областях спектра оно происходит по-разному. При прохождении монохроматического луча с длиной волны λ через рассеивающую и поглощающую атмосферу плотность потока (интенсивность) I_λ изменяется по экспоненциальному закону

$$I_\lambda = I_{\lambda 0} \exp \left[\int_x^{-\infty} k_\lambda dx \right], \quad (3)$$

где $I_{\lambda 0}$ – плотность потока излучения на верхней границе атмосферы, k_λ – коэффициент ослабления падающего потока радиации за счет рассеяния и поглощения. Если положить в этом выражении $x = h$, то

$$I_{\lambda} = I_{\lambda 0} \exp \left[- \int_h^{-\infty} k_{\lambda} dx \right] = I_{0\lambda} \exp \left[-\tau_{\lambda}(h) \right], \quad (4)$$

где $\tau_{\lambda}(h)$ – оптическая толщина (оптическая масса) атмосферы на высоте h .
При $h = 0$

$$I_{\lambda} = I_{\lambda 0} \exp \left[-\tau_{\lambda 0} \right] = I_{\lambda 0} p_{\lambda}. \quad (5)$$

Величина p_{λ} в этом выражении называется коэффициентом прозрачности атмосферы и определяет долю солнечной радиации с длиной волны λ , которая достигает поверхности Земли при перпендикулярном падении солнечных лучей. В гелиотехнике обычно используется средний по солнечному спектру индекс прозрачности атмосферы, или индекс ясности, K_{τ} , имеющий сходный с p_{λ} смысл: он представляет собой отношение лучистой энергии, пришедшей на горизонтальную земную поверхность за определенный период времени, к энергии, пришедшей за этот же период времени на такую же поверхность, расположенную вне атмосферы. Наиболее ясные дни характеризуются $K_{\tau} \approx 0,8$ (доля рассеянного излучения составляет $\sim 0,2$). В среднем, в солнечные дни с небольшой облачностью $K_{\tau} \approx 0,5$.

Для увеличения поступления солнечного излучения приемник обычно располагают не горизонтально, а под некоторым углом $0 < \beta < 90^{\circ}$ к горизонту (рис. 3). Отклонение от меридиана проекции на горизонтальную плоскость нормали к поверхности приемника характеризуется азимутом γ (для плоскости, ориентированной строго на юг $\gamma = 0$; $\gamma > 0$ для плоскости, повернутой к востоку).

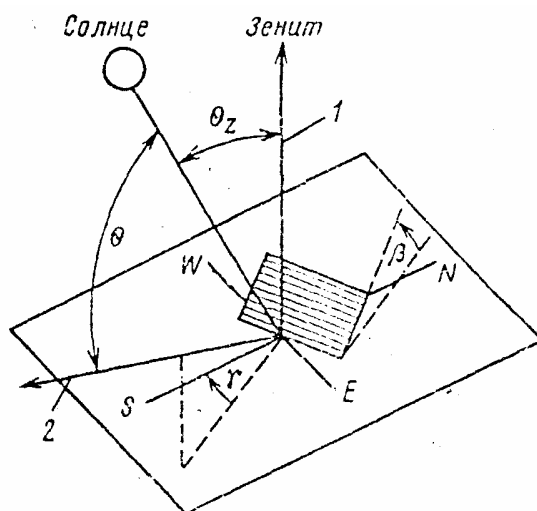


Рис. 3. Характеристики ориентации поверхности солнечного приемника: θ – угол падения солнечного излучения, θ_z – зенитный угол, β – угол наклона поверхности, γ – азимут, 1 – нормаль к горизонтальной плоскости, 2 – нормаль к наклонной плоскости.

Как и для горизонтальной поверхности, суточная облученность W , то есть полная энергия солнечного излучения, которая приходится на единицу площади поверхности солнечного приемника за день, складывается из прямого и рассеянного излучения. Для наклонной поверхности она тоже изменяется в зависимости от широты местности и времени года. При этом сезонные изменения определяются вариациями продолжительности дня, ориентацией приемной площадки, поглощением в атмосфере. Для получения максимального количества солнечной энергии приемник должен быть по возможности расположен перпендикулярно направлению потока солнечного излучения, т.е. угол падения θ должен быть равен нулю, однако это возможно лишь при наличии системы слежения за Солнцем. В солнечных установках с неподвижным приемником нулевой угол падения достигается лишь в отдельные часы отдельных дней, поэтому обычно выбирают азимут и угол наклона приемника, оптимальные с точки зрения максимума прихода солнечного излучения на его поверхность за тот или иной период. Оптимальным азимутом солнечного приемника при отсутствии на местности затеняющих объектов является $\gamma = 0$, т.е. ориентация приемника на юг. Оптимальный угол наклона приемника для систем, работающих круглогодично, в первом приближении равен широте местности; для установок, работающих лишь в теплое время года он на $10...15^\circ$ меньше, в холодное, соответственно, больше широты.

1.2. Комплекс стандартных актинометрических наблюдений

Измерение потоков солнечного излучения производится пиргелиометрами и пиранометрами⁴, а также соляриметрами и актинометрами. На метеостанциях России (и ранее – СССР), на которых проводятся наблюдения за составляющими радиационного баланса, используется как стандартная аппаратура климатологических измерений, так и приборы, разработанные и исследованные в геофизических обсерваториях [*Летопись погоды...*, 2002]. Однородность рядов актинометрических данных обеспечивается использованием однотипных приборов и их тщательной градуировкой, а также единой методикой измерений и обработки данных. В ка-

⁴ *Пиргелиометр* (от греч. $\rho\upsilon\gamma$ – огонь, $h\acute{e}lios$ – Солнце и ...метр), – абсолютный прибор для измерений прямого солнечного излучения, падающего на перпендикулярную солнечным лучам поверхность. Пиргелиометр в основном применяется для проверки относительных приборов – *актинометров*. *Пиранометр* (от греч. $\rho\upsilon\gamma$ – огонь, $\acute{\alpha}\nu\theta$ – наверху и ...метр), прибор для измерения суммарного и рассеянного солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность. Для измерения рассеянного излучения затеняется от прямых лучей Солнца специальным экраном.

честве приемников интегральной солнечной радиации (<4 мкм) на сети актинометрических станций СССР были приняты приборы Ю.Д. Янишевского: для прямой радиации – актинометр М-3, для рассеянной и отраженной от земной поверхности радиации – пиранометр М-80М, для радиационного баланса – балансомер М-10М. После распада СССР производство отечественных актинометрических приборов было практически прекращено, что привело к частичному свертыванию сети актинометрических измерений. Ряд метеостанций использует для измерений импортные приборы (преимущественно Kipp & Zonen), однако их высокая стоимость массовому применению не способствует. Ежемесячно актинометрические приборы поверяются по контрольному актинометру, который в свою очередь, каждые 1...2 года градуируется по Российскому эталону (пиргелиомеру ГГО), регулярно сравниваемому с Европейским радиационным эталоном в Давосе. Такая система поверки позволяет избежать в актинометрических данных систематических ошибок. Радиационные данные приведены к шкале МРЭ (Мировой радиометрический эталон), рекомендованный Всемирной метеорологической организацией (ВМО) в 1981 году.

Начиная с 90-х годов на метеостанциях, ведущих актинометрические измерения, внедряются современные методы регистрации и обработки актинометрических данных, создаются компьютерные базы данных.

Исчерпывающим набором измеряемых актинометрических величин, дающих фактическую основу для оценки потенциала солнечной энергии, является следующий [*Справочник эколого-климатологических..., 2003*]:

1. Солнечное сияние:

- продолжительность солнечного сияния;
- параметры временного распределения месячной и годовой продолжительности солнечного сияния.

2. Составляющие радиационного баланса:

- часовые суммы прямой солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность при средних условиях облачности;
- часовые суммы прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность при средних условиях облачности;
- часовые суммы рассеянной, суммарной, отраженной и поглощенной солнечной радиации при средних условиях облачности;
- средние, максимальные и минимальные суточные суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность;

- параметры временного распределения суточных сумм суммарной солнечной радиации и статистические характеристики суточных сумм за каждый день месяца;
- средние, максимальные и минимальные месячные и годовые суммы прямой солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность;
- средние, максимальные и минимальные месячные и годовые суммы прямой, рассеянной, отраженной, поглощенной и суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, а также параметры временного распределения этих величин (среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса).

3. Альbedo подстилающей поверхности и параметры временного распределения средних месячных и годовых его значений.

Для оценки потенциала солнечной энергии и прогноза его изменения важным является изучение трендов актинометрических величин. Так, по данным Метеообсерватории МГУ продолжительность солнечного сияния (ПСС) за 1991–2000 гг. в ноябре-феврале была на 5...16% ниже соответствующих величин за весь рассматриваемый период (1955–2000 гг.); в марте, апреле и октябре она была выше нормы на 4...6%, а в остальные месяцы и в целом за год различия не превышали 1%. Вследствие увеличения облачности годовая продолжительность солнечного сияния за период с 1955 по 2001 г. уменьшилась на 3%, а число дней без Солнца увеличилось на 7%. Наиболее сильно тенденция к уменьшению ПСС выражена зимой (17%), а наиболее слабо – осенью (3%). Анализ колебаний временных рядов годовых сумм составляющих радиационного баланса за 1958–2001 гг. показал наличие тенденции к уменьшению (4%) прямой радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, рассеянной и суммарной радиации (рис. 4).

Основной причиной отрицательной тенденции в изменении проходящей радиации является увеличение количества общей и нижней облачности, связанное с ростом повторяемости циклонических процессов над центром европейской части РФ, а также загрязнение атмосферы, вызванное влиянием города. Многолетние изменения суммарной радиации достаточно хорошо согласуются с межгодовой изменчивостью облачности и продолжительности солнечного сияния. Тенденция к уменьшению месячных сумм суммарной радиации наблюдается во все месяцы, за исключением мая, августа и октября. В январе и феврале уменьшение этой вели-

чины составило, соответственно, 19 и 14%. Отмечается существенная (15%) тенденция к уменьшению годовых сумм отраженной радиации, обусловленная в основном неустойчивостью отражательных свойств снежного покрова зимой, связанной с более ранним таянием и сходом весной. Поглощенная радиация оставалась неизменной в пределах естественной изменчивости. На этом примере видно, что актинометрические данные дают обширную информационную основу для оценки «локального» потенциала солнечной энергии, его динамики во времени, а также позволяют провести верификацию данных о падающей солнечной радиации, полученных другими методами.

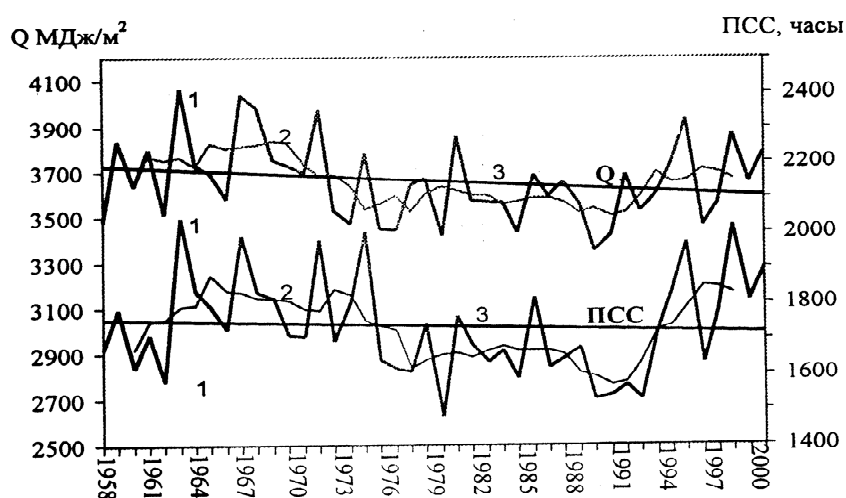


Рис. 4. Годовая сумма суммарной радиации (Q), продолжительность солнечного сияния (ПСС) (1) и их пятилетние скользящие средние (2). 3 – линия тренда

1.3. Проблемы определения гелиоэнергетических ресурсов территорий на основе наземных измерений. Характеристики временной и пространственной изменчивости падающей солнечной радиации.

Исчерпывающее описание радиационного режима на основе данных наземных измерений, необходимое для оптимизационных гелиоэнергетических расчетов, сопряжено с определенными трудностями. Во-первых, как указывалось выше, количество актинометрических станций на территории России относительно мало, во-вторых, число измеряемых характеристик солнечной радиации на них ограничено. При редкой сети станций зона экстраполяции актинометрических данных в пункты размещения гелиоустановок в большинстве случаев превышает зону репрезентативности актинометрических станций. Поэтому интерполяция и экстраполяция актинометрических данных – важнейшая задача для специалистов-географов.

Данные о приходе солнечной радиации за различные промежутки времени свидетельствуют о его значительной изменчивости в течение года, сезона и суток, обусловленной как астрономическими факторами, так и прозрачностью атмосферы и режимом облачности. Исследование характеристик структуры этой изменчивости представляет значительный интерес. Разномасштабная изменчивость прихода солнечной радиации (в пределах суток, месяцев или лет) в гелиоэнергетических расчетах учитывается неодинаково. Так, изменение интенсивности солнечного излучения в течение дня и его зависимость от суточного хода облачности влияет на производительность гелиоустановки и на режим отбора производимой энергии. Внутримесячная изменчивость сумм радиации определяет эффективность использования установленной мощности гелиоустановок и необходимость создания систем долгосрочного аккумулирования и резервных источников энергии. Годовой ход солнечной радиации позволяет судить о режимах работы гелиоустановок в течение года и общей энергообеспеченности потребителей. Рассмотрим основные характеристики временных рядов солнечной радиации, которые, как показано в работах ГГО [*Рекомендации...*, 1987], необходимо учитывать при оценках потенциала солнечной энергии для данной территории, а также для выбора режима работы и параметров гелиоустановок.

1.3.1. Характеристики временной структуры рядов солнечной радиации

Средние многолетние суммы радиации (нормы)

При вычислении средних многолетних сумм солнечной радиации необходимо выбрать величину периода осреднения рядов актинометрических наблюдений, на которую кроме временной изменчивости влияет степень однородности имеющихся наблюдений и практическая потребность в точности средней суммы. Анализ, проведенный на материале наблюдений актинометрических станций [*Рекомендации...*, 1987], показал, что исходные ряды солнечной радиации имеют не исключенные погрешности, которые возникают из-за инструментальных ошибок, а также вследствие микроклиматических различий. Для месячных сумм суммарной и рассеянной радиации эти погрешности составляют 3...5% в теплый период года и 8...10% в холодный период, для радиационного баланса и прямой радиации – 15...20% в течение года. Ошибки исходных рядов суточных сумм суммарной радиации, полученных путем непрерывной ре-

гистрации, составляют 10...15%. Другие виды радиации в теплый период имеют такие же погрешности, зимой ошибки выше. Если указанные погрешности месячных и годовых сумм солнечного излучения принять за критерии целесообразности точности средних, то при доверительной вероятности 0,9 для солнечной радиации необходимая длина ряда данных составит 30...35 лет, а при вероятности 0,68 достаточно 10-летних рядов. Расчеты показывают, что такие и даже более короткие ряды дают ошибку среднего не более 5...6%, т.е. не выходящую за пределы точности исходных рядов. Средние многолетние значения (нормы) являются основой для построения карт сумм солнечной радиации, наглядно отражающих общие закономерности распределения радиации по территории. Карты месячных сумм прямой и суммарной радиации приведены в, частности, в работе [Пивоварова, 1977].

Экстремальные суммы радиации

Кроме средних значений потребителю необходимо располагать сведениями об изменчивости падающей солнечной радиации в отдельные годы и дни. Возможные пределы отклонений оцениваются по экстремальным данным. Экстремумы не являются фиксированными и зависят от объема выборки. Абсолютный максимум и минимум характеризуют наибольший и наименьший приход радиации за весь период наблюдений. Для получения достоверных абсолютных значений экстремумов необходимо наличие достаточно длинных рядов. Анализ распределения средних суточных максимумов суммарной радиации по территории европейской части России дает четкую зависимость от широты – возрастание с севера на юг. Средний суточный минимум также имеет широтное распределение. Однако эта зависимость справедлива только для горизонтальной поверхности и даже для нее может нарушаться из-за влияния особенностей циркуляции воздуха в атмосфере и структуры облачности.

Средние квадратичные отклонения

Изменчивость суточных, месячных и годовых сумм радиации количественно оценивается средним квадратичным отклонением σ . Эта статистическая характеристика необходима при анализе достоверности аномалий радиации, установлении однородности ее поля, а также может использоваться как критерий оценки предельных ошибок пространственной корреляции (в случае однородного поля). Средние квадратичные отклонения месячных или среднемесячных суточных сумм радиации (σ_{30}) ха-

рактируют межгодовую изменчивость, отклонения суточных сумм (σ_l) – межсуточную. Последняя по данным актинометрических станций в 3...4 раза больше межгодовой. Исследования показали, что по территории России средние квадратичные отклонения месячных и суточных сумм солнечного излучения изменяются мало и в условиях равнины остаются практически постоянными на расстоянии до нескольких сотен километров, что позволяет интерполировать их в условиях редкой сети актинометрических станций с небольшой погрешностью.

Средние квадратичные отклонения сумм радиации разного временного масштаба осреднения являются показателями устойчивости радиационного режима. Принято рассматривать отношение σ к среднему многолетнему – коэффициент вариации C_v . Он используется для анализа пространственной изменчивости сумм солнечной радиации с учетом различий между летними и зимними суммами. Наибольшая изменчивость суточных и месячных сумм суммарного солнечного излучения наблюдается на территории России зимой и осенью, наименьшая – летом. Это соотношение характерно как для северных, так и для южных районов, но на севере коэффициент вариации больше, чем на юге.

Коэффициенты асимметрии и эксцесса

Наконец, немаловажным для описания радиационного режима (а следовательно, и потенциала гелиоресурсов) той или иной территории является вычисление статистических характеристик более высокого порядка – коэффициентов асимметрии и эксцесса. Как показали исследования [Пивоварова, 1977; Рекомендации..., 1987], распределение месячных сумм радиации близко к нормальному, а распределение суточных сумм в значительной степени от нормального отличается. И если вероятностные характеристики месячных сумм радиации можно рассчитать, зная средние суммы и их средние квадратичные отклонения, то чтобы получить вероятностные характеристики суточных сумм радиации, требуется, прежде всего, установить закон их распределения. Для этой цели необходимо рассчитать коэффициенты асимметрии A и эксцесса E и получить эмпирические кривые распределения.

Причиной асимметрии временных рядов солнечной радиации является наличие пределов: с одной стороны – нуля, с другой – максимально возможных сумм (при безоблачном небе). Мода (точка максимума плотности) асимметричного распределения может быть меньше медианы – его

среднего значения (положительная асимметрия) или больше (отрицательная асимметрия). Распределение может быть островершинным или плосковершинным, если в области, лежащей вблизи среднего значения, наблюдается непропорционально большое или малое число случаев. Это указывает на наличие положительного или отрицательного эксцесса, соответственно. Ценность коэффициентов асимметрии и эксцесса заключается в том, что они выражают основные особенности эмпирических распределений и позволяют рассчитать параметры выражений, аппроксимирующих распределения.

При использовании сравнительно коротких рядов актинометрических наблюдений (12...13 лет) предполагают, что выборочные оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса с вероятностью 99% должны лежать в пределах тройной ошибки их расчета. При $|A| \geq 0,4$ и $|E| \geq 0,8$, т.е. значениях, равных или больших тройной ошибки их определения, можно предположить, что распределение существенно отличается от нормального.

Средние многолетние величины, как отмечено выше, являются необходимыми, но недостаточными энергетическими характеристиками сумм солнечной радиации. В работах по оценке обеспеченности территории СССР ресурсами солнечной энергии [Пивоварова, 1977; Стадник, 1983] проводился анализ статистических характеристик суточных сумм суммарной солнечной радиации в целях районирования территории страны по типам распределения. Для идентификации типов распределения использовались коэффициенты асимметрии и эксцесса, их сочетания, суточные суммы суммарной радиации и их изменчивость. Было выделено шесть характерных для территории СССР типов распределения [Стадник, 1984]: I – нормальное; II – положительно асимметричное; III – положительно асимметричное, островершинное; IV – отрицательно асимметричное, V и Va – отрицательно асимметричное, островершинное, VI – бимодальное и VIa – симметричное, плосковершинное, VII – не вошедшие в классификацию горные районы (рис. 5).

1.3.2. Пространственная корреляция сумм солнечной радиации

Наряду с временной структурой рядов солнечной радиации, большое значение имеет также и их пространственная структура. Ее исследование необходимо для определения радиационных характеристик в пунктах, где актинометрические наблюдения не проводятся, для расчета средних по площади параметров солнечного излучения, для решения вопроса об ав-

томатическом контроле качества метеорологических наблюдений и др. Обычно определение средней по площади климатической характеристики сводится к ее осреднению по выборочной сети станций. Если сеть редкая, используют данные всех имеющихся пунктов наблюдений. В отношении солнечной радиации на преобладающей части территории России даже этот прием применить нельзя, поскольку площадь, на которую приходится один пункт актинометрических наблюдений колеблется (данные на конец 1980-х – начало 1990-х годов) от 52 тыс. км² на юге Дальнего Востока и 55 тыс. км² на юге европейской части страны до 225 тыс. км² на севере Западной Сибири и 245 тыс. км² на севере Восточной Сибири (рис. 1).

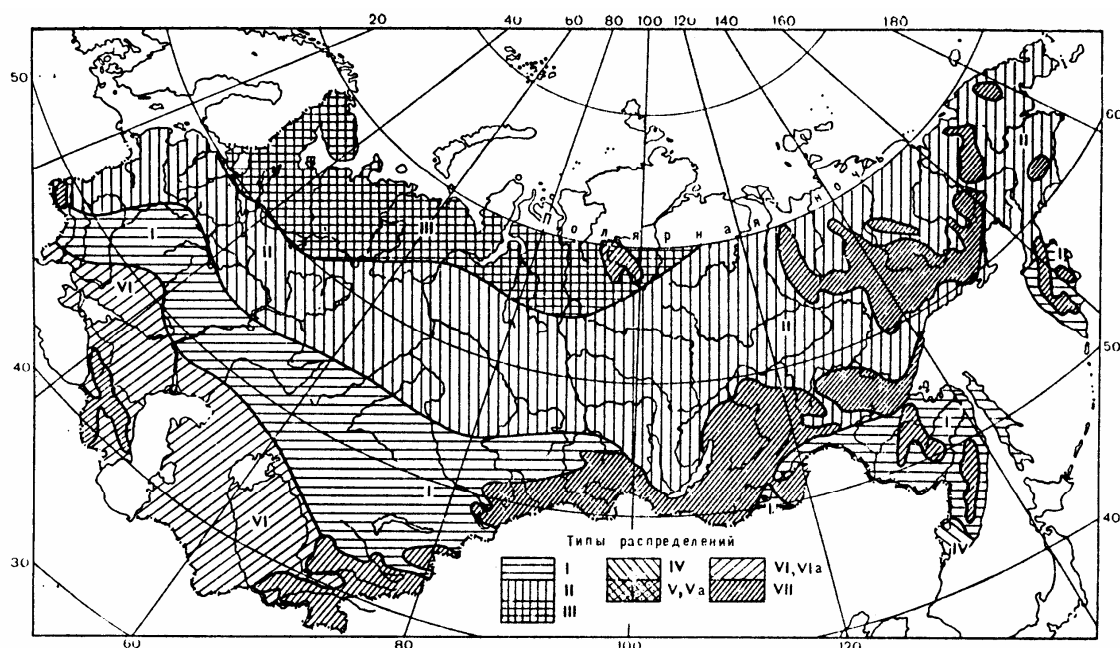


Рис. 5. Районирование территории СССР по типам распределения суточных сумм суммарной солнечной радиации. Январь. Типы распределения: I – нормальное; II – положительно асимметричное; III – положительно асимметричное, островвершинное; IV – отрицательно асимметричное; V – отрицательно асимметричное, островвершинное; VI – бимодальное; VII – горные районы

Как один из методов решения проблемы недостаточности актинометрических данных в [Ливоварова, 1977] было предложено обратиться к осреднению продолжительности солнечного сияния (сеть гелиографических станций в 4...5 раз гуще актинометрической), а затем, используя ее корреляцию с суммарной солнечной радиацией, определить последнюю. Осреднение было выполнено интерполяцией в узлы координатной сетки имеющих данных по 1100 станциям о средней многолетней продолжительности солнечного сияния [Справочник по климату..., 1967]. Были построены рабочие карты (масштаб 1:7500000) за четыре месяца (январь, апрель, июль, октябрь), причем каждая карта была разбита на 5-градусные трапе-

ции (144 трапеции к югу от 70°с.ш.)⁵. Величины продолжительности солнечного сияния SS для трапеции получались усреднением ее значений в узлах сетки, являющихся вершинами трапеции. Месячная сумма суммарной солнечной радиации Q оценивалась по эмпирической формуле Ангстрёма

$$Q = Q_0 \left(a + b \frac{SS}{SS_0} \right), \quad (6)$$

где Q_0 – средняя многолетняя месячная сумма суммарной радиации на поверхности Земли при безоблачном небе; SS – измеренная, а SS_0 – астрономически возможная продолжительность солнечного сияния для данной широты, коэффициент a характеризует долю суммарной радиации, пропущенную облаками, а коэффициент b – долю задержанной облаками суммарной радиации. Результаты расчетов – карты средних по площади 5-градусных трапеций месячных сумм суммарной солнечной радиации – иллюстрирует рис. 6.

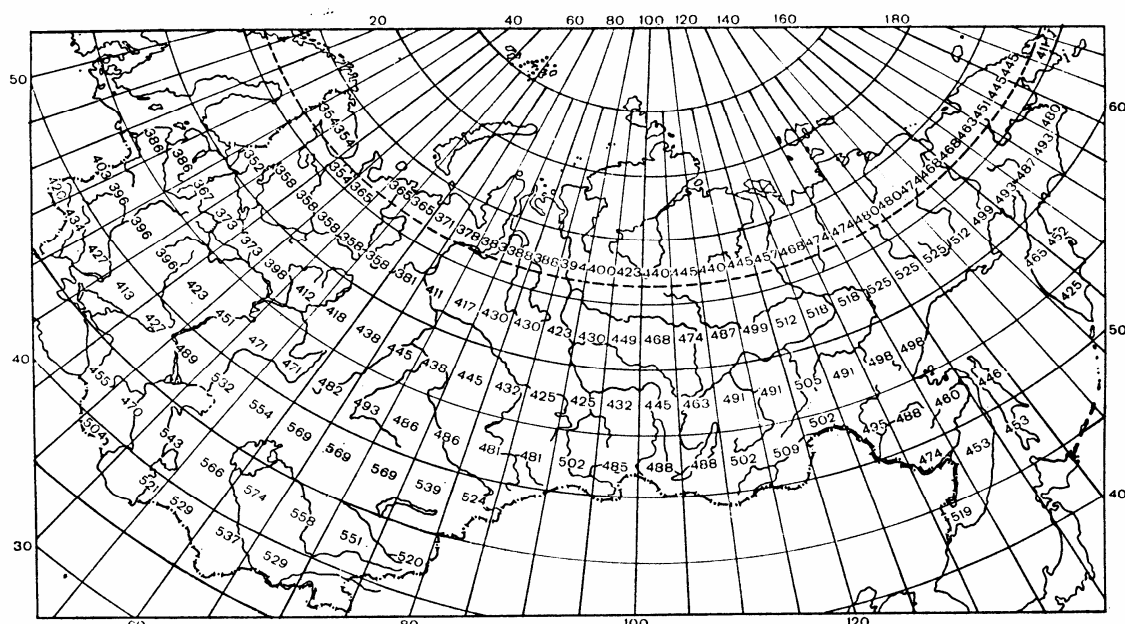


Рис. 6. Средняя многолетняя месячная сумма суммарной солнечной радиации по площади 5-градусных трапеций (МДж/м²). Апрель

Приход суммарной солнечной радиации при безоблачном небе (см. рис. 5) зависит от широты места, высоты солнца, прозрачности атмосферы и состояния подстилающей поверхности. Для территории СССР ха-

⁵ Трапеции не являются равновеликими по площади, т.к. длина дуги, соответствующая 1°, на разных широтах различная (на экваторе – 111,3 км, на широтах 30,50 и 70°, соответственно, – 95,5, 71,7 и 38,2 км).

рактен бóльший приход суммарной радиации (при безоблачном небе) в восточных регионах по сравнению с западными. Отклонение изолиний от широтного распределения в значительной степени объясняется влиянием прозрачности атмосферы, которая в свою очередь изменяется под влиянием как естественных факторов – увеличения влагосодержания и запыленности к югу, – так и антропогенных – роста загрязнения атмосферы в промышленных районах. По оценке [Пивоварова, 1977] отличие данных, полученных усреднением только по сети актинометрических станций, от описанных выше расчетов средней по площади 5-градусной трапеции месячной суммы суммарной радиации для зимнего периода составляет 8...20%, а в остальное время – 8...9%.

Отметим, что существуют и другие методы оценки прихода солнечной радиации на поверхность земли, связанные с использованием процедур экстраполяции и интерполяции имеющихся данных метеостанций. Потребителю солнечной энергии важно знать величину ошибки использования в интересующей его местности данных ближайшей, а иногда и весьма отдаленной актинометрической станции, т.е. количественную оценку ошибки экстраполяции. При экстраполяции суточных сумм суммарной радиации на расстояние 100 км погрешность суточной суммы составляет [Пивоварова, 1977]:

- зимой и осенью 0,6...0,9 МДж/(м² сутки),
- весной и летом 3,2...3,6 МДж/(м² сутки).

Для пункта, удаленного на расстояние 200 км от данной станции, погрешность составит соответственно 0,8...1,5 и 4,6...4,8 МДж/м² за сутки. Для 300 км эти цифры возрастут уже до 6,1...6,5 МДж/м² за сутки (для условий июля). Указанные погрешности были сопоставлены со значениями суточных сумм суммарной радиации, полученными из данных актинометрических измерений, проводимых в Метеообсерватории МГУ им. М.В.Ломоносова. При средних значениях суточных сумм суммарной солнечной радиации в январе 1,98 МДж/м² (период осреднения 1958...2000 гг.) ошибки экстраполяции на 100 км составляют 30...45%, на 200 км – 40...75%. Средние значения суммарной суточной солнечной радиации за июль в тот же период составили 18,9 МДж/м², а погрешности экстраполяции на 100 км – 19%, на 200 км – 25%, на 300 км – 35%, что, безусловно, сказывается на точности проектирования, выборе оборудования и режимов работы гелиоустановок, а также прогнозах количества получаемой энергии.

Экстраполяция *осредненных за месяц* суточных сумм радиации на те же расстояния сопровождается меньшими ошибками. Полученные в ГГО для европейской части СССР величины погрешностей экстраполяции осредненных за месяц суточных сумм суммарной радиации (МДж/м²) приведены в таблице 1.

Для практических задач целесообразно применять линейную интерполяцию сумм радиации по двум точкам. По оценкам, полученным для умеренных широт европейской части страны [Пивоварова, 1977], интерполяция на середину расстояния между станциями (до 400 км) уменьшает ошибки по сравнению с экстраполяцией в 1,5...2 раза для суточных сумм радиации и в 2...2,5 раза для средних месячных суточных сумм.

Таблица 1

Погрешности экстраполяции осредненных за месяц суточных сумм суммарной радиации (МДж/(м²сут))

МЕСЯЦ	Расстояние (км)				
	0	50	100	200	400
Январь	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6
Июль	0,8	1,0	1,1	1,4	2,2

Сравнение ошибок экстраполяции с погрешностью измерений показывает, что в условиях европейской части России расстояние между станциями, на котором ошибка интерполяции не превышает ошибку определения сумм в пункте наблюдений, изменяется от 50...80 км зимой до 80...130 км летом. Отсюда следует, что данные наблюдений на существующей сети актинометрических станций можно распространять на другие пункты, расположенные в пределах 50...130 км с однородными условиями подстилающей поверхности и прозрачности атмосферы. Для пунктов, удаленных от станции актинометрического наблюдения на большие расстояния, необходима интерполяция данных двух или нескольких близлежащих метеостанций. При расстоянии между метеостанциями более 500 км, что характерно для большей части азиатской территории России, погрешность и интерполированных данных достаточно высока, что делает их для инженерных расчетов солнечных установок непригодными. Тем не менее, путем интерполяции с учетом территориальных вариаций преобладающих видов облачности, состава, количества и свойств атмосферного аэрозоля, альbedo подстилающей поверхности, уровня загряз-

ненности атмосферы и других факторов в ГГО были составлены карты распределения солнечной радиации по территории СССР, и проведено районирование территории по условиям обеспеченности ресурсами солнечной энергии.

На рис. 7 приведена карта годового прихода солнечной радиации при безоблачном небе, составленная по материалам наблюдений сети актинометрических станций СССР за период их работы по 1980 г. Распределение солнечной радиации по территории в целом носит широтный характер. Отклонение от широтного распределения уровня поступления солнечного излучения проявляется в его увеличении в направлении с юго-запада на северо-восток под влиянием распространения атлантических воздушных масс над Евразией и в заметном его снижении в летний период из-за муссона на территориях, примыкающих к Тихоокеанскому побережью.

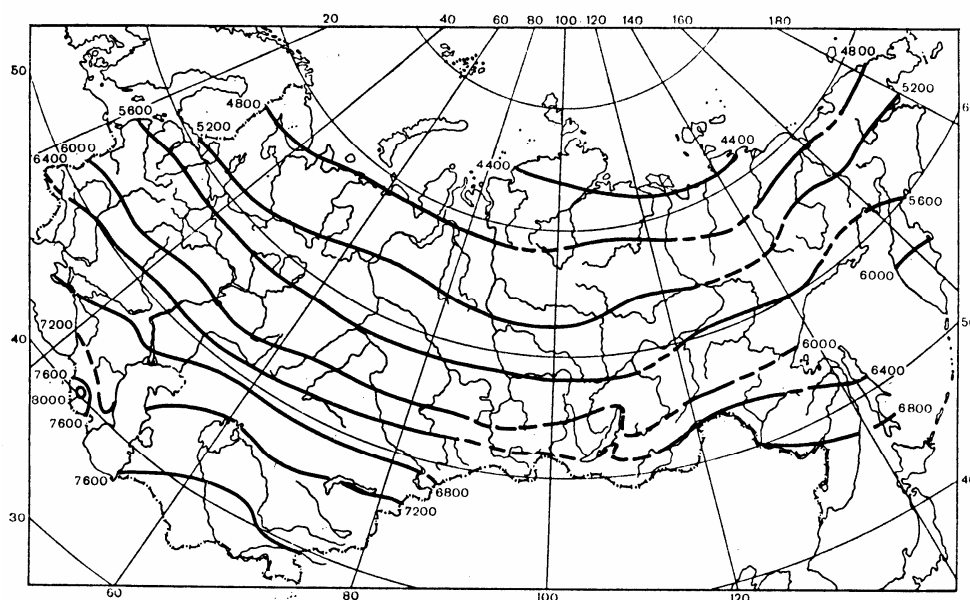


Рис. 7. Средняя многолетняя годовая сумма суммарной солнечной радиации при безоблачном небе ($\text{МДж}/\text{м}^2$) [Пивоварова, Стадник, 1988]

При районировании территории бывшего СССР на основе полученных данных [Рекомендации..., 1987] материковая часть территории СССР, расположенная южнее 70°с.ш. делилась на 10-градусные широтные зоны, которые для учета особенностей физико-географических условий рассматривались отдельно в пределах пяти регионов СССР: Европейская часть страны (Кавказ – до 1000 м над уровнем моря), Средняя Азия, Урал и Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Дальний Восток. Материковая часть территории СССР севернее 70°с.ш. и острова арктического бассейна были выделены в отдельный район без деления в меридиональном направлении. Всего таким образом было выделено 11 зон. Одновременно

был сформирован комплекс радиационных показателей, отражающих средний многолетний режим, изменчивость и особенности суточного хода солнечной радиации:

1. Первым показателем для каждого района являлась сумма суммарной солнечной радиации за четыре «центральных» месяца (январь апрель, июль, октябрь).

2. В качестве второго показателя для каждого района принято отношение годовой суммы прямой радиации на горизонтальную поверхность к годовой сумме суммарной радиации.

3. Третий показатель, учитывающий внутримесячную изменчивость суммарной радиации, – тип распределения суточных сумм суммарной солнечной радиации. В порядке убывания приоритета типы распределения располагаются следующим образом: отрицательно асимметричное островершинное, отрицательно асимметричное, нормальное, бимодальное, положительно асимметричное, положительно асимметричное островершинное.

4. Число часов суммарной радиации со средней часовой мощностью более 600 Вт/м^2 в годовой совокупности многолетних суточных сумм солнечного излучения выбрано в качестве четвертого показателя для учета особенностей суточного изменения энергетического уровня радиации [Стадник, 1983].

5. В качестве пятого показателя использовалась относительная характеристика межгодовой изменчивости – коэффициент вариации годовых сумм суммарной радиации, отражающий степень устойчивости из года в год радиационного режима.

Ранжирование районов по обеспечению ресурсами солнечного излучения с учетом выбранных показателей выполнялось с использованием алгоритма [Вимберг, Елисеева, 1985]. По результатам расчетов районам были присвоены номера в соответствии с приоритетом потенциала солнечной энергии (рис. 8).

По результатам ранжирования наибольшим потенциалом солнечной энергии обладали южные районы СССР – Средняя Азия (1), юг Европейской части России (2) и юг Дальнего Востока (3). Выполненное ГГО им. А.Е. Воейкова районирование явилось ценным опытом решения задачи определения степени обеспеченности различных регионов ресурсами солнечного излучения. Появившиеся в последние годы новые источники метеорологической информации, основанные, в частности, на многолет-

них спутниковых наблюдениях за поверхностью земного шара, предоставили возможность получить более детальные актинометрические данные, которые могут быть использованы для оценки ресурсов солнечного излучения.

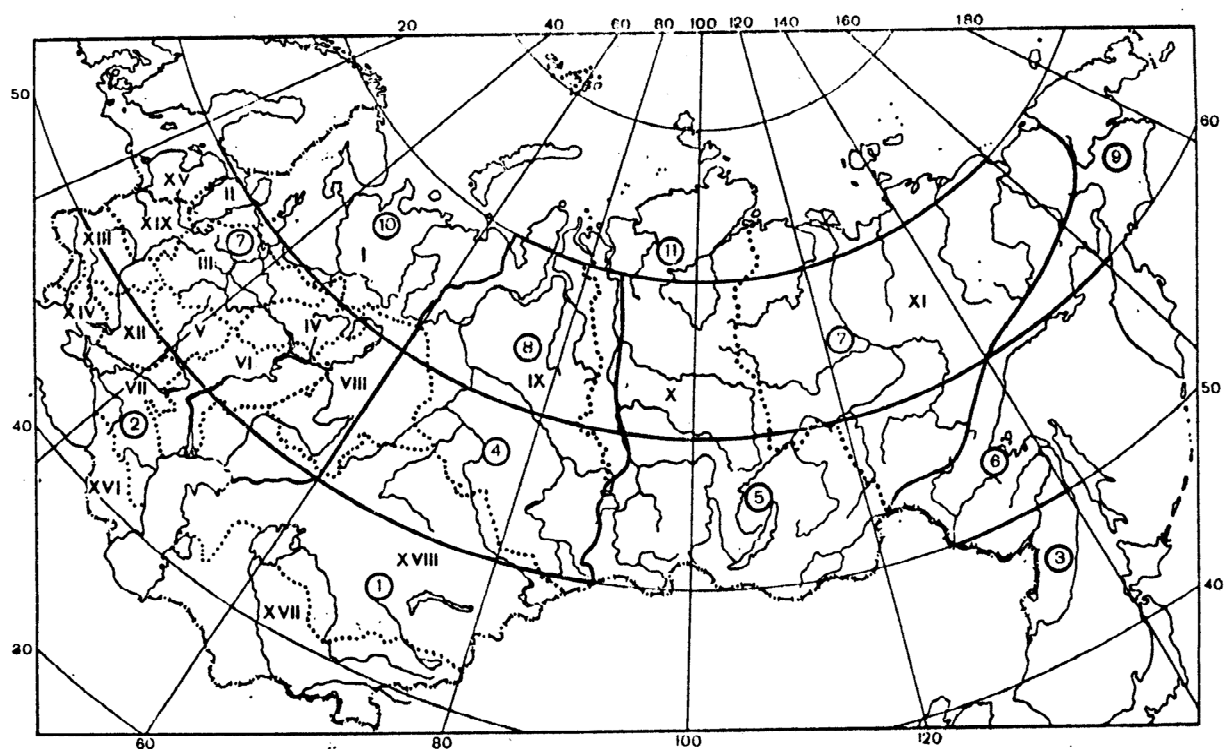


Рис. 8. Районирование территории СССР по потенциалу солнечной радиации [Рекомендации..., 1987]. Цифра в кружке – номер района по приоритету потенциала, римская цифра – номер экономического района, точки – границы районов.

Глава 2. Принципы построения базы данных NASA

2.1. Базы данных как источники актинометрической информации для проектирования солнечных и ветровых установок

Переход к современным методам регистрации метеорологических данных с использованием машиночитаемых носителей естественным образом привел к созданию баз данных (БД) климатологической и, в частности, актинометрической информации. На сегодняшний день существует значительное число таких компьютерных баз данных. Они различаются по источникам информации (наземные измерения или спутниковые наблюдения); периодам сбора данных (от 1 до 30 лет); представлением характеристик солнечной радиации (получасовые, часовые, месячные, годовые значения); возможностям пространственной интерполяции.

Одна из первых актинометрических баз данных была выполнена в виде приложения к Европейскому атласу солнечной радиации (E.S.R.A). База содержала значения месячных сумм суммарной и рассеянной радиации с 1966 по 1975 гг. для 340 пунктов наблюдения в Европе и Северной Африке. Издание Европейского атласа 2000 г. (The European Solar Radiation Atlas, версия 2000 г.) помимо книжной формы было представлено компакт-диск. Атлас охватывает территорию 30° з.д. – 70° в.д.; 25° – 75° с.ш.; интервал измерений в этом издании продлен до 1990 г., количество пунктов наблюдения увеличилось до 586. В БД представлены карты распределения среднемесячных значений суммарной и прямой солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность (кВтч/м^2). При этом используются результаты как наземных, так и спутниковых измерений и моделирования в целях проведения интерполяционных процедур; дополнительно к актинометрическим данным приведены значения температуры и атмосферного давления.

Швейцарская база данных METEONORM, шестая версия которой вышла в 2007 г., является одной из наиболее полных по номенклатуре данных (суммарная, прямая и рассеянная солнечная радиация, продолжительность солнечного сияния, температура, давление и влажность атмосферного воздуха, скорость ветра, осадки). В METEONORM включены данные из нескольких источников, охватывающих различные части мира; проведена проверка их реалистичности. В редакции 6.0 представлены: GEBA (Global Energy Balance Archive), World Meteorological Organization (WMO/OMM) и

Швейцарская база данных (составленная по материалам MeteoSwiss). Всего используются климатологические данные 7756 метеостанций по всему миру. Периоды осреднения: 1961-1990 и 1996-2005 (для температуры, влажности, осадков и скорости ветра). Для областей с малой плотностью станций погоды используются данных спутниковых наблюдений. В рассмотрение включены прогнозы климатических изменений.

Информация по 1093 метеостанциям (суммарная солнечная радиация, температура и влажность окружающего воздуха, скорость ветра) содержится в программных продуктах RETScreen (Канада). Следует отметить, что сегодня любое претендующее на охват значительной территории расчетное исследование установок, использующих энергию солнца и ветра, в качестве «побочного продукта» приводит к накоплению структурированных климатологических данных. Так, авторы настоящей работы располагают массивом месячных сумм суммарного солнечного излучения, среднемесячных температур и влажностей окружающего воздуха и скоростей ветра для 1036 метеостанций по всему миру, собранным с использованием данных наземных измерений RETScreen, TRNSYS и отечественных метеостанций [*RETScreen International...*, 2007; *TRNSYS...*, 2007; *Научно-прикладной справочник...*, 1990].

Если говорить о возможности использования для оценки ресурсов солнечной энергии результатов актинометрических измерений на станциях РФ, то помимо климатических справочников, издававшихся ГГО им. А.И. Воейкова, существует возможность воспользоваться on-line доступом к массивам накопленных данных, аккумулированных в Мировом центре радиационных данных (World Radiation Data Centre). Эта структура, которая была создана в 1964 г. как лаборатория ГГО, выступает в настоящее время также как специализированный центр Всемирной метеорологической организации (WMO). В настоящее время центр располагает информационно-поисковой системой с архивом и систематически пополняемой базой данных о составляющих радиационного баланса для станций измерения, входящих в сеть WMO. Доступ удаленных пользователей к информационным ресурсам осуществляется через интернет по адресам: <http://wrdc.mgo.rssi.ru> или wrdc-mgo.nrel.gov.

Информация о некоторых базах актинометрических данных представлена в таблице 2. Важно подчеркнуть, что, как правило, БД подготовлены на основе информации, предоставленной национальными метеорологическими организациями, и таким образом, в той или иной мере повторяют

данные национальных справочников, в том числе российских. Этим и определяется их главный недостаток – необходимость интерполяции и экстраполяции данных, – обусловленный невысокой плотностью расположения существующих метеостанций. Применительно к условиям России эта проблема стоит особенно остро из-за большой территории и довольно редкой сети актинометрических наблюдений.

Таблица 2

Характеристики основных баз данных по солнечной радиации

Характеристики	E.S.R.A. 1996	E.S.R.A. 2000	METEON ORM 6,0	<i>Climate 1</i>	WRDC	S@tel - Light
Форма представления	Книга с дискетой	CD с приложениями в 2-х книгах	CD и справочник	CD	Интернет	Интернет
Условия доступа	Оплачивается	Оплачивается	Оплачивается	Оплачивается	Бесплатно	Бесплатно
Web-адрес	–	www.ensmp.fr/Fr/Services/Presses/ENS	www.meteotest.chl	www.climat-e-one.de	http://wrdc.mgo.rssi.ru	www.satellight.com
Масштабы применения	Европа и Северная Африка	Европа и Северная Африка	Всемирная	Всемирная	Всемирная	Европа и Северная Африка
Представленные величины ⁶	S, D	S, D, T, P	S, D, T, V, W, P	S, T, V, W	S, D	S, D
Период измерений, годы	1966–1975	1966–1990	1961–1990 и 1996–2005	Различные	1964–1993	1996–2000
Детализация значений ⁷	m	m, h	m, h	m	m	h h
Число пунктов наблюдения	340	586	7756	>1200	1195	–
Пространственная интерполяция	Нет	Нет	Да	Нет	Нет	Да

⁶ S – суммарная солнечная радиация, D – рассеянная солнечная радиация, T – температура воздуха, P – атмосферное давление, V – скорость ветра, W – влажность воздуха

⁷ m – среднемесячные значения, h – среднечасовые значения, h h – получасовые значения.

Бурное развитие в последнее время методов спутниковых наблюдений и измерений позволяет подойти к задаче пространственной интерполяции актинометрических данных иначе, поскольку использование космических аппаратов дает возможность равномерно «покрыть» достаточно большие территории. Наземные станции актинометрического наблюдения при этом играют роль точек привязки спутниковых данных и верификации моделей распространения солнечного излучения в атмосфере. Известны две базы данных, основанных на спутниковых наблюдениях. Одна из них – S@tel–Light – содержит результаты дистанционных измерений, проведенных в 1996–2000 гг. База содержит получасовые суммы суммарной и рассеянной солнечной радиации, имеется возможность пространственной интерполяции данных по Европе и Северной Африке. Заказанные пользователем данные высылаются ему электронной почтой. Вместе с тем, база содержит только актинометрические данные, информация о температуре окружающего воздуха и скорости ветра в ней отсутствует. Для каких-либо оценок применительно к территории России база S@tel–Light непригодна, поскольку содержит данные лишь для относительно небольшой зоны в Европейской части страны.

Более интересной для использования на территории России является другая база данных, созданная Национальным агентством по авиации и исследованию космического пространства США (NASA) и подробно описанная ниже.

2.2. База климатологических данных NASA Surface meteorology and Solar Energy: методы получения и представления данных

Большие возможности оценки гелиоресурсов открываются в связи с разработкой базы данных космического агентства США NASA SSE (NASA Surface meteorology and Solar Energy), первая версия которой появилась в 1997 г. Первоначально она представляла собой массив данных, полученных в результате спутниковых измерений радиационного баланса земной поверхности, проводившихся в рамках программы World Climate Research Program's International Satellite and Cloud Climatology Program (ISCCP) в 1983–1993 гг. В настоящее время база данных NASA SSE оперирует данными спутниковых и наземных наблюдений за период с 01.07.1983 по 30.06.2005. По результатам измерений с использованием различных моделей распространения солнечного излучения в атмосфере

рассчитываются значения месячных сумм солнечной радиации, падающей на поверхности различной ориентации, других актинометрических и метеорологических характеристик. Учитываются особенности различных климатических зон земного шара, в том числе характер отражения излучения от земной поверхности (альбедо), состояние облачности, загрязнение атмосферы аэрозолями. Методология проекта в целом разрабатывалась с участием: The DOE National Renewable Energy Laboratory (NREL, США); The World Radiation Data Center (WRDC, Санкт-Петербург, Россия); The Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (the Global Energy Budget Archive (GEBA), Швейцария); Natural Resources Canada (RET-Screen database, Канада); The NOAA Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory (CMDL, США).

Отработка и апробация методики пересчета осуществлялась с привлечением данных наземных измерений, выполненных для того же временного диапазона, (проект GEOS-4 – Goddard Earth Observation System), в том числе, для нескольких российских метеостанций. Наземные метеостанции, актинометрические измерения которых использовались для верификации расчетных моделей, приведены на рис. 9 и 10.

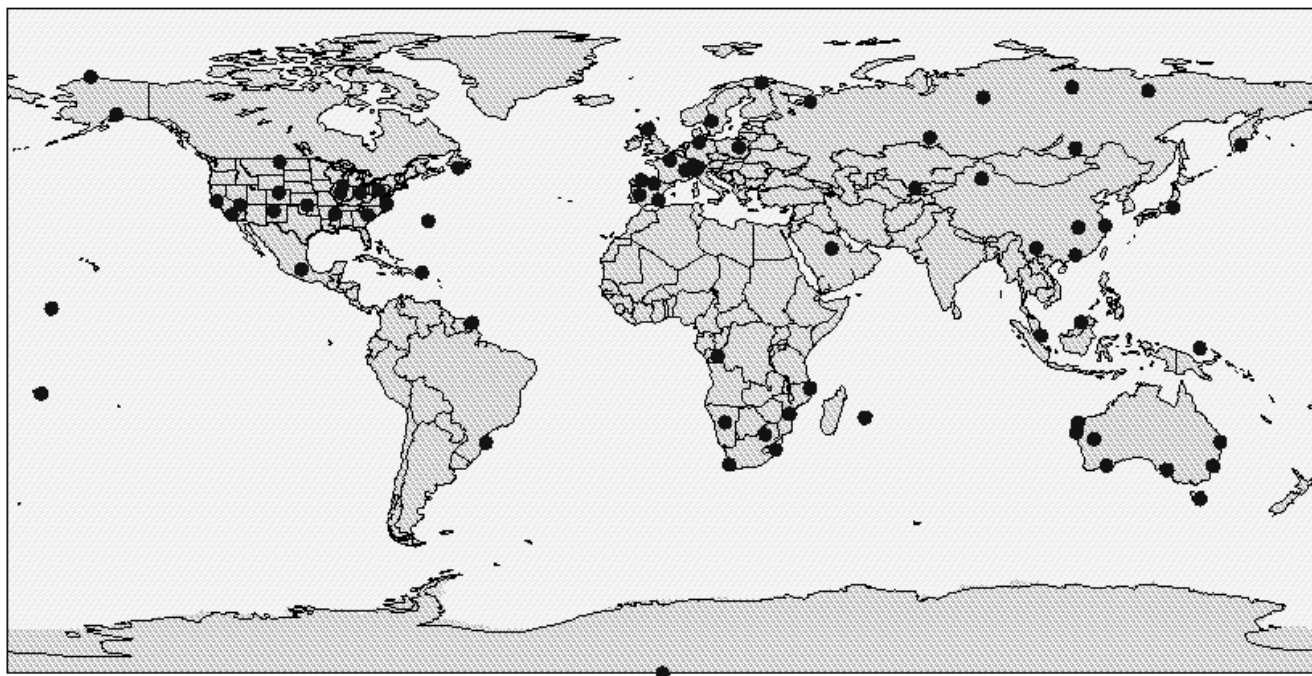


Рис. 9. Станции актинометрических наблюдений, данные которых использовались для верификации расчетов рассеянной радиации по методу Пейджа.

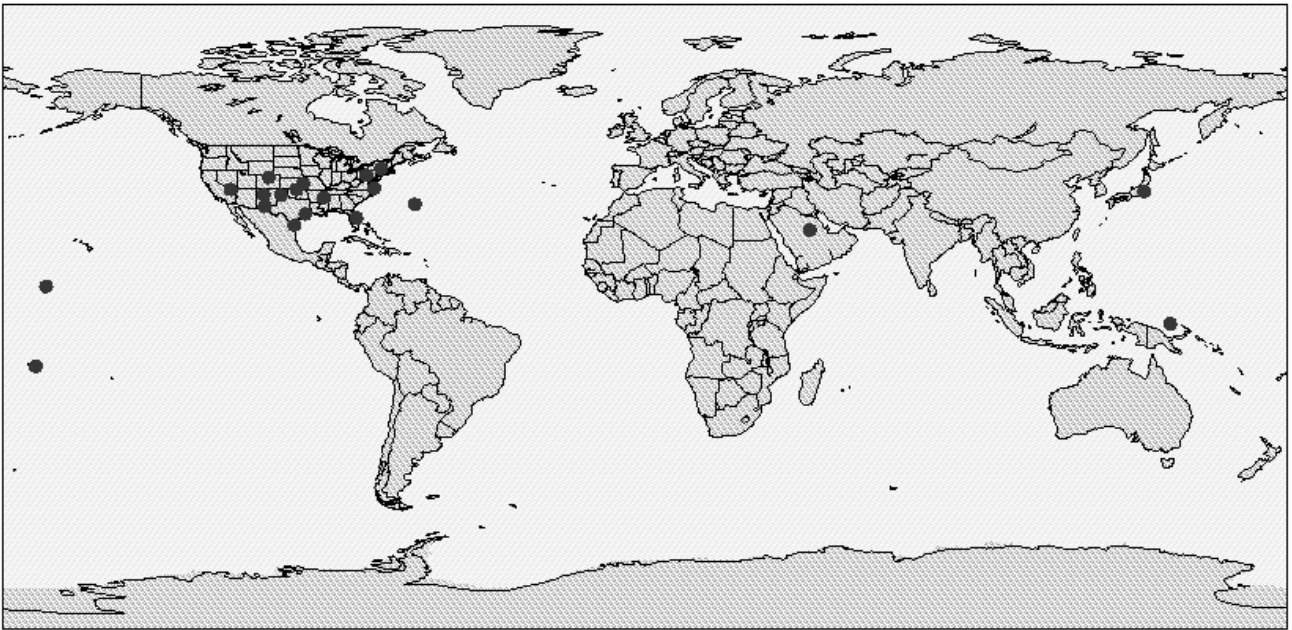


Рис. 10. Станции актинометрических наблюдений, данные которых использовались для верификации расчетов интенсивности прямой солнечной радиации (на нормальную лучу поверхность) и рассеянной радиации.

Рассчитанные значения сумм солнечной радиации интерполированы на сетку $1^\circ \times 1^\circ$ по всему земному шару (измерения и расчет выполнялись для сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$). Массив данных структурирован по возможным потребителям (фотоэлектрические панели и солнечные коллекторы, солнечные кухни, системы с аккумуляторами энергии и тепла). База данных бесплатна, доступна через интернет (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>) и содержит следующие группы параметров:

1. Среднемесячные дневные суммы (кВтч/м^2) прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную и наклонную (широта -15° , широта, широта $+15^\circ$) плоскость, на следящую за Солнцем поверхность (для прямой радиации), а также на плоскость, наклоненную под оптимальными месячными (с точки зрения максимума прихода радиации) углом (для суммарной радиации) и сами эти углы наклона. Среднемесячные дневные суммы радиации при ясном небе. Среднемесячная интенсивность (кВт/м^2) суммарной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность в полдень.

2. Среднемесячное число ясных дней. Максимальное увеличение и уменьшение по отношению к среднемесячным суммам радиации (%). Среднемесячное значение индекса прозрачности, значение индекса прозрачности при ясном небе, количество дней без Солнца.

3. Характеристики положения Солнца (солнечная геометрия).

4. Минимальная доступная солнечная радиация в течение различных периодов последовательных дней (1, 3, 7, 14, 21 день) (%), дефицит солнечной радиации по сравнению с ожидаемой в течение различных периодов последовательных дней (1, 3, 7, 14, 21 день) (кВтч/м²).

5. Параметры облачности: среднемесячное количество облаков в течение светового дня (%), частота ясного и облачного неба.

6. Температура: среднемесячная температура воздуха на высоте 10 м над уровнем земли (°C), дневной диапазон изменения температуры, количество дней с прогревом воздуха выше/ниже 18, 10 и 0°C, среднемесячная температура поверхности почвы, минимальные/максимальные температуры и амплитуды колебаний температуры почвы, среднемесячные значения точки росы.

7. Ветер: среднемесячные значения скорости ветра на высоте 50 м над поверхностью земли (м/с), максимальные увеличение и уменьшение по отношению к среднемесячной скорости ветра на высоте 50 м, повторяемость (процент времени) ветра, имеющего скорость в интервалах (0...2)...(19...25) м/с, среднемесячное направление ветра на высоте 50 м; среднемесячные значения скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью земли (для условий местности типа «аэропорт») и разница этих скоростей и скоростей ветра на высоте 50 м (м/с). Скорость ветра на высоте до 300 м для различных типов поверхности.

8. Среднемесячные значения относительной и абсолютной влажности, давления воздуха, количества осадков.

9. Вспомогательная информация: Среднемесячные дневные суммы солнечной радиации на верхней границе атмосферы (кВтч/м²), альbedo земной поверхности.

Остановимся на общих положениях, лежащих в основе методов построения базы климатологических данных NASA.

2.3. Методы расчета плотности потока падающей солнечной радиации на горизонтальную и наклонную поверхность, выбор регионов, сходных по климатическим условиям

Выше уже отмечено, что при расчетах на основе данных спутниковых наблюдений необходимо учитывать региональные климатические особенности. При построении базы данных NASA была принята классификация климатических зон по [Smith, 2002]. Она основана на количестве

длинноволновой (инфракрасной) солнечной радиации, поглощенной земной поверхностью, а также количестве аэрозоля, водяного пара, озона и т.д. в атмосфере. Учтены также факторы, оказывающие влияние на коротковолновую радиацию, поглощаемую поверхностью Земли: альbedo земной поверхности, количество облаков в течение дня, и индекс прозрачности атмосферы.

Среднемесячный индекс прозрачности атмосферы k определяется здесь как отношение месячной суммы падающей солнечной радиации на уровне земной поверхности H к месячной сумме солнечной энергии, приходящей на горизонтальную поверхность на верхней границе атмосферы H_0 (см. раздел 1.1). Этот параметр характеризует ослабление потока солнечной энергии в атмосфере в результате поглощения и рассеяния на аэрозолях, а также молекулярного поглощения, поглощения озоном и водяным паром.

Основой для расчета потока солнечной радиации, падающей на поверхность земли, H , является усовершенствованный алгоритм Пинкера и Ласло [*Pinker, Laszlo, 1992*], использованный в проекте NASA «Глобальная энергия и гидрологический цикл. Радиационный баланс земной поверхности» (NASA/Global Energy and Water Cycle Experiment, GEWEX. Surface Radiation Budget, SRB). Использовались также результаты упомянутой выше Программы исследования климата Земли с помощью международной спутниковой системы и климатологической программы NASA по изучению облаков (NASA World Climate Research Program's International Satellite and Cloud Climatology Program (ISCCP) [<http://isccp.giss.nasa.gov/>]).

Данные о содержании в атмосфере водяного пара были получены в результате спутниковых наблюдений в системе NASA Goddard Earth Observation System (GEOS) с трехчасовым разрешением по времени. Содержание озона в атмосфере определялось спектрометрическим измерением концентрации этого газа (программа Total Ozone Mapping Spectrometer, TOMS). Основными параметрами в расчетах являлись количество аэрозоля и оптические характеристики облаков. Все результаты пересчитывались на сетку $1^\circ \times 1^\circ$ с использованием различных способов пространственного осреднения, билинейной интерполяции и т.д.; в итоге был получен массив данных, покрывающий весь земной шар (64800 регионов – ячеек сетки).

Значительное количество различных метеорологических событий в период измерений обеспечивало изменчивость облачности, содержания во-

дяного пара и озона в атмосфере, характеристик ветра и т.д., что привело в результате к межгодовым вариациям данных. Тестирование результатов расчетов по базе данных наземных актинометрических измерений Baseline Surface Radiation Network (BSRN) за период с 1983 по 2006 гг. показало, что наиболее точными являются результаты, относящиеся к средним за месяц суммам солнечного излучения. При этом, максимально приближенной к результатам наземных измерений является суммарная солнечная радиация (табл. 3).

Таблица 3

Результаты сравнительного анализа данных NASA SSE и BSRN для среднемесячных значений падающей солнечной радиации (июль 1983 – июнь 2006 гг.)

Параметр	Регион	Систематическая погрешность (%)	Среднеквадратичное отклонение (%)
Суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность	Вся земная поверхность	-0.01	10.25
	60°...90° с/ю.ш.	-1.18	34.37
	0°...60° с/ю.ш.	0.29	8.71
Рассеянная солнечная радиация на горизонтальную поверхность	Вся земная поверхность	7.49	29.34
	60°...90° с/ю.ш.	11.29	54.14
	0°...60° с/ю.ш.	6.86	22.78
Прямая солнечная радиация на следящую за солнцем поверхность	Вся земная поверхность	-4.06	22.73
	60°...90° с/ю.ш.	-15.66	33.12
	0°...60° с/ю.ш.	2.40	20.93

Среднемесячные дневные суммы солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, использовались в качестве исходных данных для расчета сумм прямой и рассеянной радиации, а также сумм солнечной радиации, приходящей на наклонные поверхности. Доля рассеянной радиации в сумме солнечного излучения, приходящего на горизонтальную поверхность, определяется методом Эрбса [Erbs D.G., 1982] или расширенным методом Пейджа [NASA Surface..., 2007]. Для широт менее 55° (в обоих полушариях) и коэффициентов прозрачности атмосферы $0,3 < k < 0,8$ оба метода дают результаты, различающиеся не более, чем на 15%. В полярных широтах (выше 67°) метод Пейджа использовать не

рекомендуется. Далее осуществляется переход от среднемесячных значений к часовым с использованием коэффициентов, предложенных Колларесом-Перейрой и Раблом для суммарной солнечной радиации и Лю и Джорданом – для рассеянной. После этого часовые суммы солнечной радиации пересчитываются на наклонную поверхность и интегрируются за день. Пересчет осуществляется одним из трех методов: RETScreen (в предположении изотропного распределения рассеянной радиации); Переса/Эрбса и Переса/Пейджа (для неизотропного распределения рассеянной радиации). Первые два используют метод Эрбса для определения доли рассеянного излучения, третий – Пейджа.

По утверждению разработчиков базы данных NASA, использованные методы расчета солнечной радиации приводят к результатам, отличающимся друг от друга в пределах 15% для середины лета при угле наклона приемника, равном широте. Различия превышают 15% лишь в зимний период для широт выше 40°.

База данных NASA Surface meteorology and Solar Energy (NASA SSE) содержит результаты многолетних наблюдений за солнечной радиацией и метеорологические данные для сетки 1°×1°, покрывающей весь земной шар. Естественно, эти данные не отражают микроклимат отдельных территорий, и в этом смысле значение качественных наземных измерений велико. С другой стороны, ценность базы данных NASA SSE определяется тем, что она позволяет восполнить недостаток наземных измерений, а там, где они проводятся, дополнить их. В частности, в последней версии программного продукта RETScreen [RETScreen International..., 2009] использована комбинированная база климатологической информации, содержащая как данные наземных измерений, так и параметры, полученные из базы данных NASA SSE.

2.4. Сравнение актинометрических данных NASA с данными наземных измерений для территории России

Поскольку при верификации данных специалистами NASA были использованы результаты наблюдений лишь нескольких российских метеостанций (рис.9, 10), то в работе был проведен дополнительный анализ достоверности массива данных NASA SSE. Такие расчеты были необходимы еще и потому, что практически половина территории РФ лежит в широтах выше 60°, для которых, как видно из табл. 3, точность данных NASA минимальна.

Анализ выполнялся в двух направлениях:

- сравнение данных NASA и наземных измерений 50 актинометрических станций (рис. 11), составляющих почти половину метеостанций, ведущих актинометрические наблюдения на территории России;
- детальное сравнение актинометрических данных базы NASA и данных актинометрических наблюдений метеообсерватории МГУ им. М.В. Ломоносова и метеостанций Южного федерального округа России.



Рис. 11. Актинометрические станции России, данные которых были использованы при проведении верификации базы NASA SSE

Параметром сравнения была относительная погрешность δ сумм суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность. Погрешность анализировалась как по отдельным пунктам наблюдений, так и по всем пунктам за определенные промежутки времени (год, теплая половина года, летние месяцы). Результаты сравнения в зависимости от географической широты метеостанций приведены на рис. 12. Для большинства пунктов сравнения погрешность не превышает 5%, что вполне удовлетворительно для проведения гелиотехнических расчетов. Не обнаружено увеличения δ с ростом широты. Погрешность превышает 10% лишь для нескольких пунктов: Южно-Сахалинска ($46,9^\circ$ с.ш.), Енисейска ($58,5^\circ$ с.ш.), Ванавары ($60,3^\circ$ с.ш.), Туры ($64,3^\circ$ с.ш.), Туруханска ($65,8^\circ$ с.ш.) и некоторых других. Эти значительные отклонения актинометрических данных либо являются результатом случайных ошибок, либо возникают в ре-

зультате недостаточного учета в математических моделях NASA локальных особенностей климата в этих регионах.

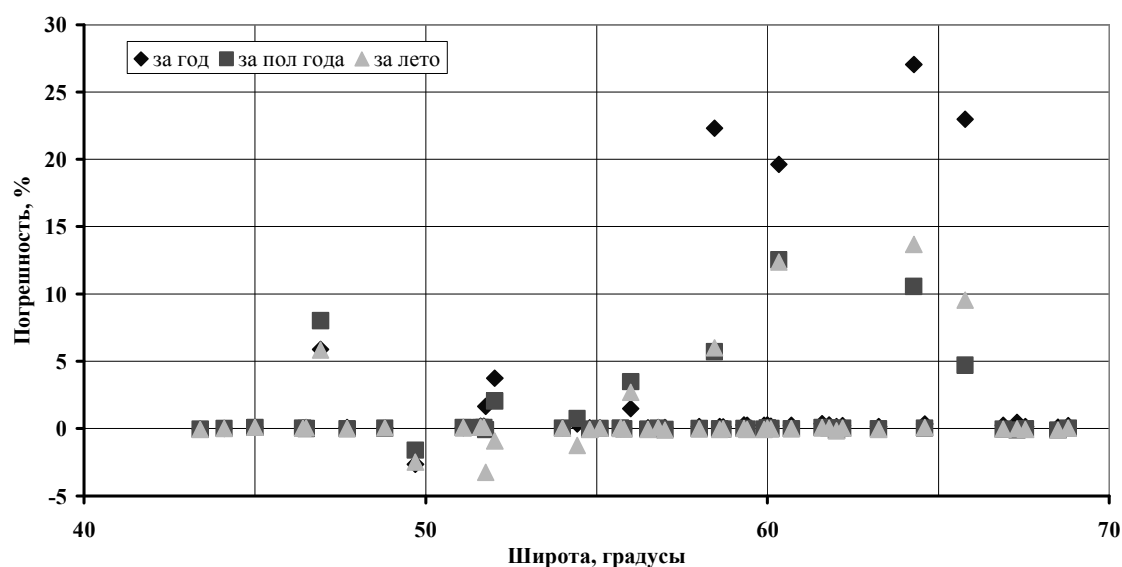


Рис. 12. Относительная погрешность сумм суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в зависимости от широты за год, теплые полгода, летние месяцы.

В течение года относительная погрешность естественно изменяется. Это иллюстрирует рис. 13 на котором приведена зависимость от времени осредненной по всем пунктам сравнения δ и ее стандартного отклонения.

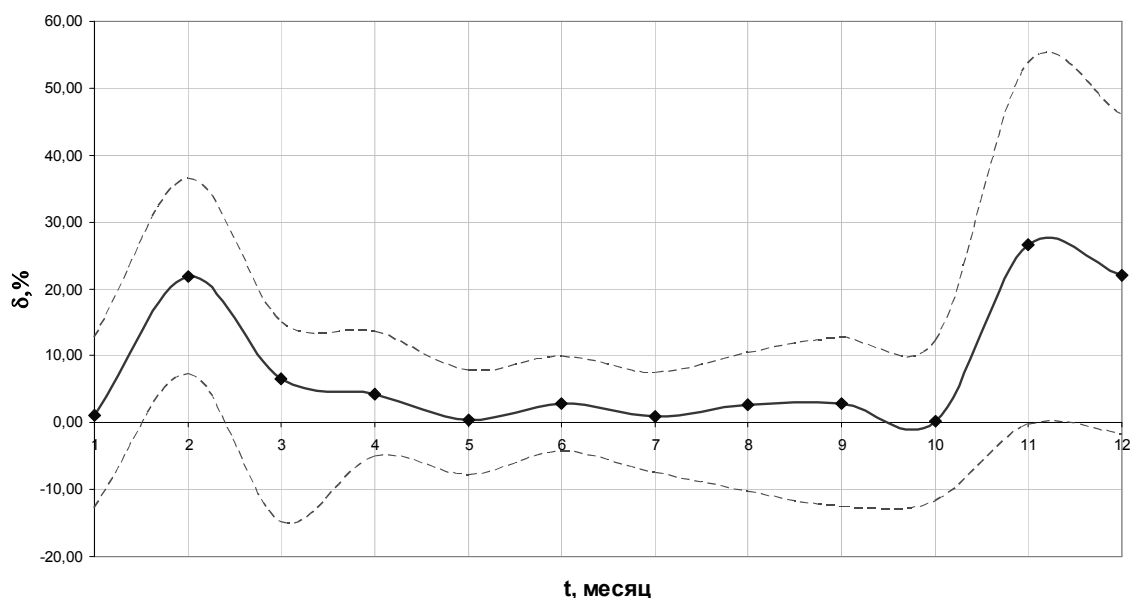


Рис. 13 Средняя по выборке из 50 пунктов сравнения относительная погрешность данных NASA в зависимости от времени (сплошная линия) и ее стандартное отклонение (пунктир).

Приведенные данные, а также более детальная диаграмма (рис. 14), отражающая погрешности среднемесячных сумм падающей солнечной радиации для каждого пункта актинометрических наблюдений, показы-

вают, что в теплые полгода (и тем более в летние месяцы) для абсолютно-го большинства метеостанций δ не превышает 10...15%; более высокая погрешность наблюдается лишь в зимние месяцы.

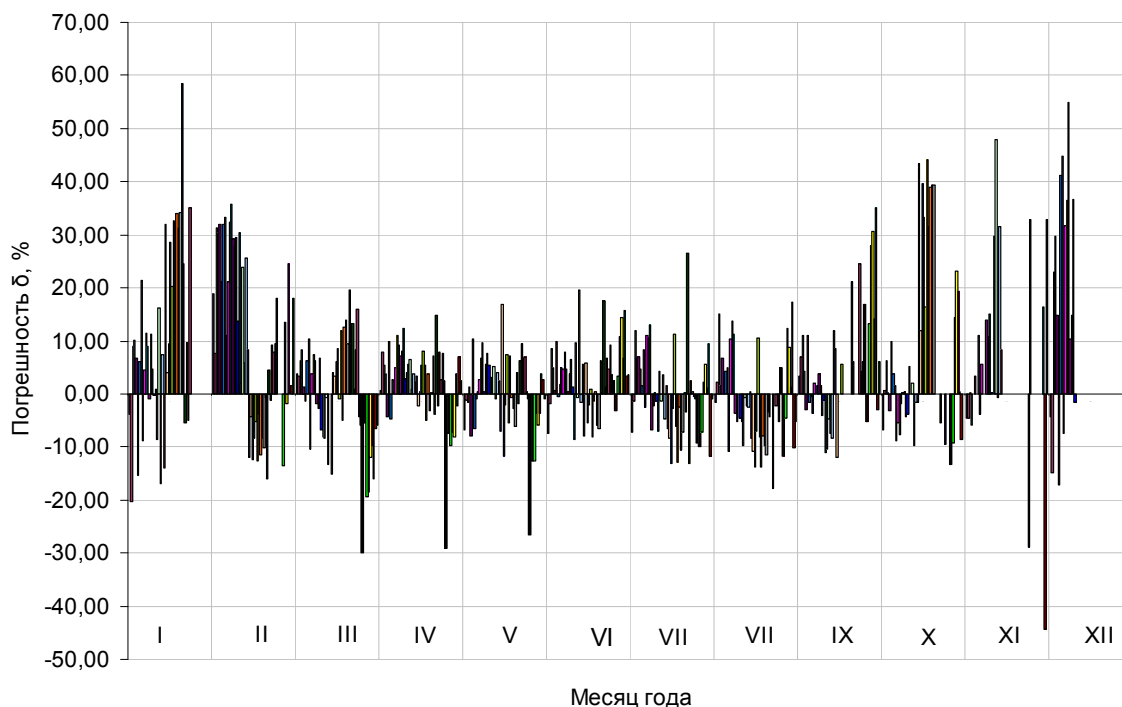


Рис. 14. Изменение в течение года относительная погрешность данных NASA (месячная сумма суммарной солнечной радиации) для различных метеостанций.

Одной из причин достаточно высоких значений погрешности для отдельных пунктов сравнения и периодов осреднения может быть то, что для верификации математических моделей NASA, как уже отмечалось выше, были использованы данные весьма ограниченного количества метеостанций России, расположенных в основном в ее Европейской части. Кроме того, создатели базы данных отмечают, что некоторые математические методы в высоких широтах либо дают ошибку более 15%, либо вообще не могут быть использованы (например, расширенный метод Пейджа не применим для широт более 67°). В любом случае, выяснение причин высоких относительных погрешностей, которые могут иметь как объективный, так и субъективный характер, требует специальных изысканий. В тех же точках, где указанная погрешность невелика (<15%), данные NASA вполне удовлетворительны для оценки потенциала солнечной энергии территории и расчета характеристик установок, использующих солнечную энергию.

Детальный анализ достоверности данных NASA был проведен с использованием актинометрических измерений метеообсерватории МГУ для двух периодов наземных наблюдений: 1961–1990 гг. и 1991–2000 гг.

(рис. 15). В этом случае надежность исходных данных не вызывает сомнений, поскольку метеообсерватория МГУ оснащена регулярно поверяемыми актинометрическими приборами; а непрерывная автоматизированная регистрация измерений ведется здесь начиная с 1954 г. При сравнении были использованы данные NASA, относящиеся к узлу сетки, максимально приближенному по координатам к Москве.

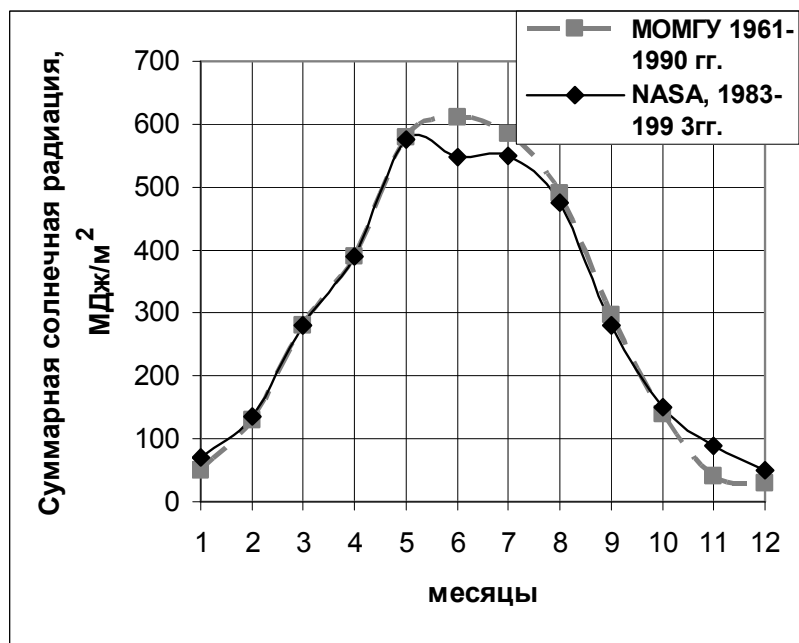


Рис. 15. Месячные суммы суммарной солнечной радиации по данным NASA (1983–1993 гг.) и МО МГУ (1961–1990 гг. и 1991–2000 гг.).

Принципиальных различий в распределении месячных сумм суммарной солнечной радиации по данным NASA и МО МГУ не было выявлено и в этом случае. Наибольшее абсолютное различие в данных отмечается для июля, но в относительных величинах оно не превышает 15%. Это подтверждают графики распределения относительного отклонения месячных сумм суммарной солнечной радиации, которые практически идентичны для обоих периодов (рис. 16). Диаграммы показывают, что погрешность максимальна (до 35%) в зимние месяцы, а в период март–октябрь не превышает 10%.

Таким образом, относительные отклонения данных NASA SSE от результатов наземных измерений по месячным суммам солнечной радиации для большинства «солнечных» месяцев и регионов России не превышает 10...15%, что вполне приемлемо для инженерных расчетов эффективности использования солнечных установок.

Таким образом, база данных NASA SSE позволяет преодолеть существующие недостатки наземных метеорологических измерений, которые имеют ограниченный потенциал с точки зрения оценки ресурсов солнечной и ветровой энергии, поскольку зачастую располагаются на значительном удалении от рассматриваемых при оценках территорий. В то же время «ручная» загрузка массивов данных из базы NASA SSE представляет собой рутинную и требующую большого времени процедуру, отвлекающую специалистов от более квалифицированной работы. Серьезной технической проблемой является также последующая проверка и преобразование больших массивов данных в форматы, удобные для использования при построении карт и подготовке исходных данных для численного моделирования. Эти проблемы определили создание (на основе NASA SSE) электронной базы данных, содержащей климатическую информацию для различных регионов России, включая данные по солнечной радиации на различным образом ориентированные в пространстве неподвижные поверхности и на следящую за Солнцем поверхность, по скоростям ветра на высотах 10 и 50 м, по температуре окружающей среды и по относительной влажности воздуха для ячеек территории с размерами $1^\circ \times 1^\circ$ широты и долготы, а также многолетние усредненные данные конкретных метеостанций.

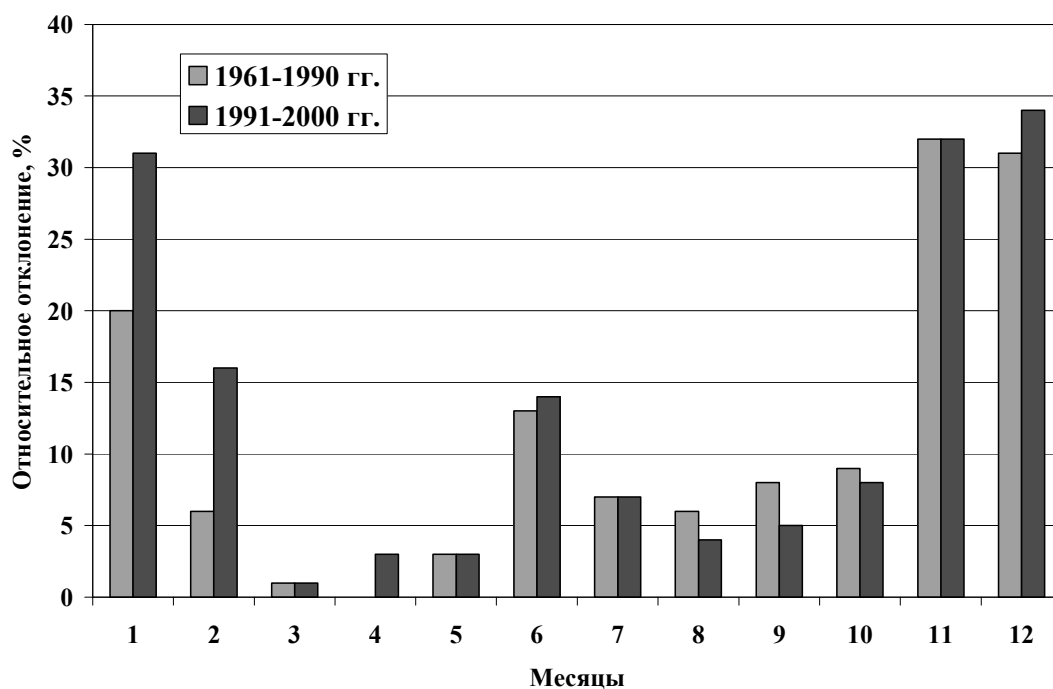


Рис. 16. Относительная погрешность месячных сумм суммарной солнечной радиации (данные NASA SSE в сравнении с данными МО МГУ 1961–1990 гг. и 1991–2000 гг.).

Глава 3. Электронная база климатической информации для территории Российской Федерации

3.1 Описание электронной базы климатической информации для территории Российской Федерации

База данных содержит информацию по 3959 географическим точкам на территории России, полученную из базы спутниковых наблюдений NASA SSE версии 6.0, а также доступную информацию о наземных измерениях климатических параметров из базы данных RETScreen International. Последний массив помимо собственно данных наземных измерений, соответствующих значениям параметров, имеющимся в климатических справочниках, для величин, данные наземных измерений для которых отсутствуют, содержит данные спутниковых наблюдений NASA SSE. Структура данных идентична структуре NASA SSE. Локальная база данных представляет собой программный комплекс объемом 180 мегабайт, запускаемый исполняемым файлом `meteo.exe`.

При запуске программы открывается стартовое окно (рис. 17), содержащее информацию о разработчиках продукта, а также об источниках информации. Окно может быть закрыто кнопкой «далее» и вновь открыто в любой момент из пункта меню «О программе».

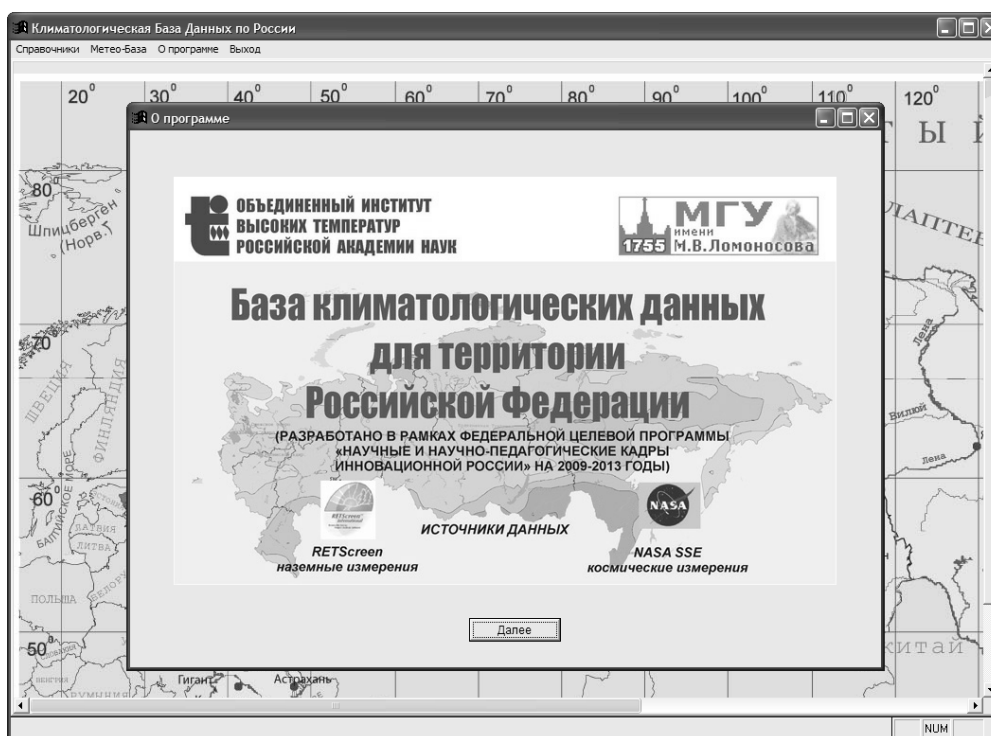


Рис. 17. Стартовое окно климатологической базы данных

Для удобства ориентации пользователя в географических координатах различных пунктов на территории России, фоном рабочего окна программы является карта России с нанесенной на нее сеткой широт и долгот, повторяющая рис. 11.

Пункт меню «Справочники» является служебным и предназначен для контроля и перевода на русский язык названий климатологических величин, содержащихся в базе. Доступ к данным осуществляется через подпункты меню «Метео-база». Первый из них – «Просмотр данных» – открывает окно просмотра климатической информации для конкретного населенного пункта (рис. 18, режим выборки – по географическому названию, рис. 19, режим выборки – по географическим координатам).

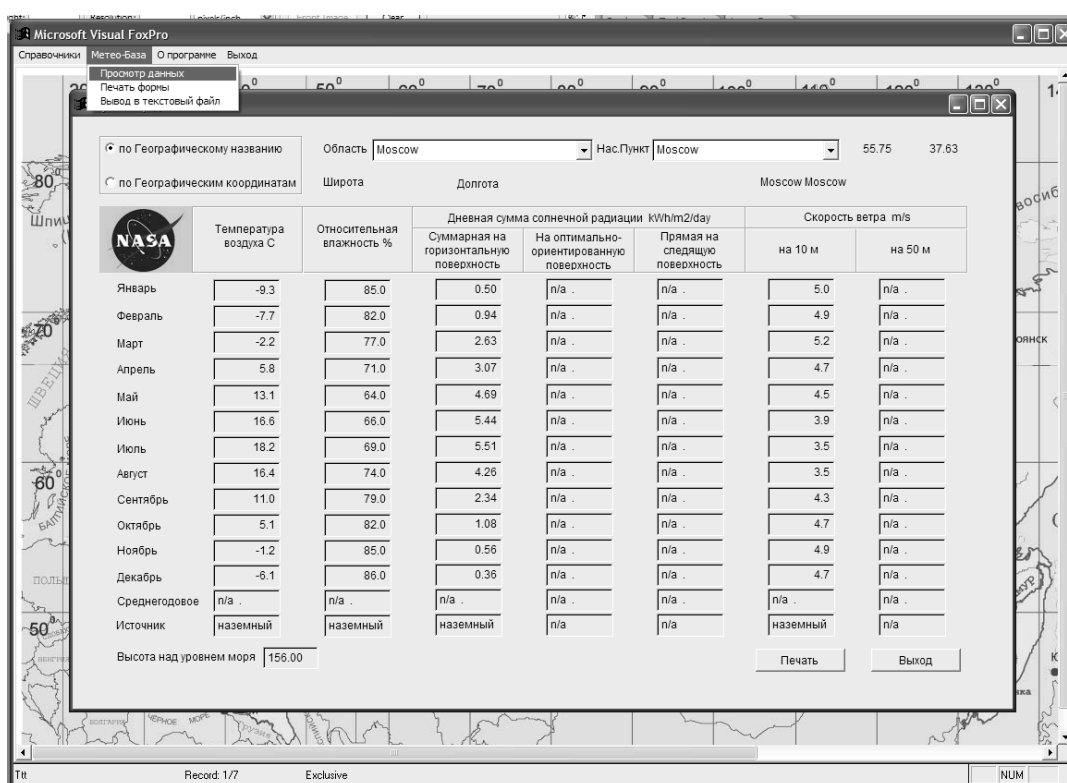


Рис. 18. Окно программы в режиме просмотра данных по названию населенного пункта

В обоих случаях для конкретного населенного пункта на экран выводится информация из базы данных RETScreen с указанием источника (наземные данные или данные NASA). Отметим, что широту и долготу необходимо выбрать из предлагаемых в «выпадающем» меню значений, «ручной» ввод данных в соответствующие поля программа не поддерживает.

Для просмотра данных из базы NASA SSE в режиме «по географическим координатам» необходимо выбрать целые значения широты и долготы (рис. 20).

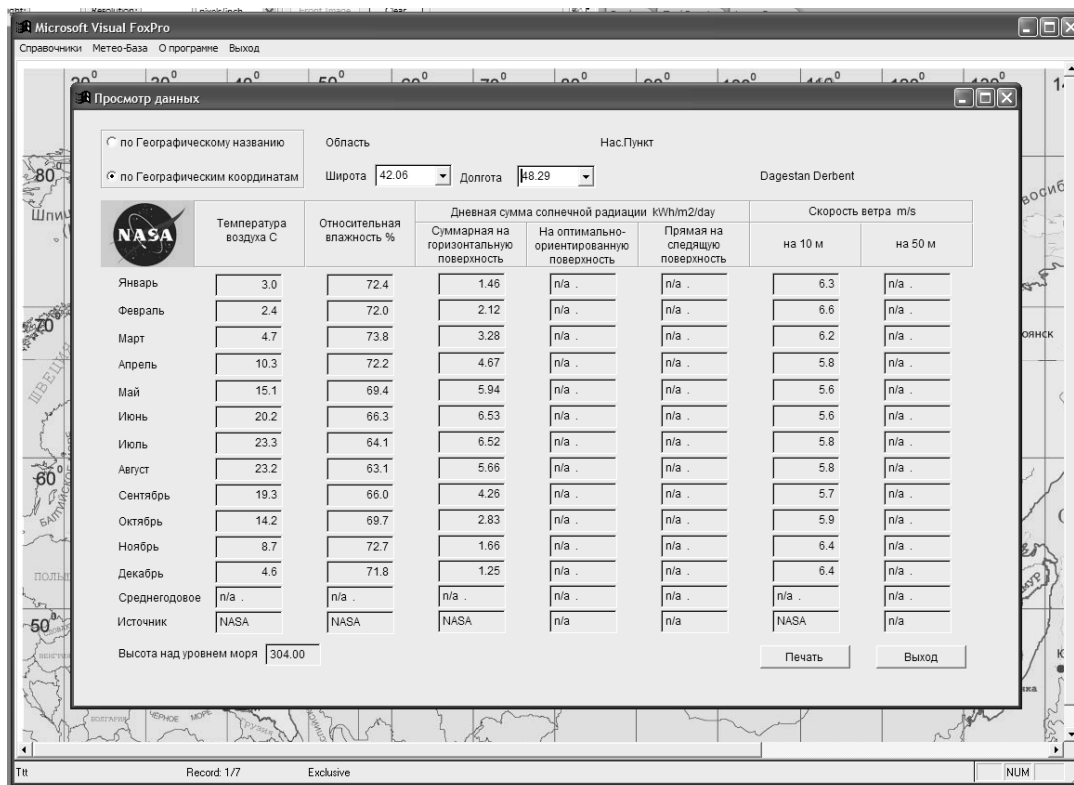


Рис. 19. Окно программы в режиме просмотра данных по географическим координатам

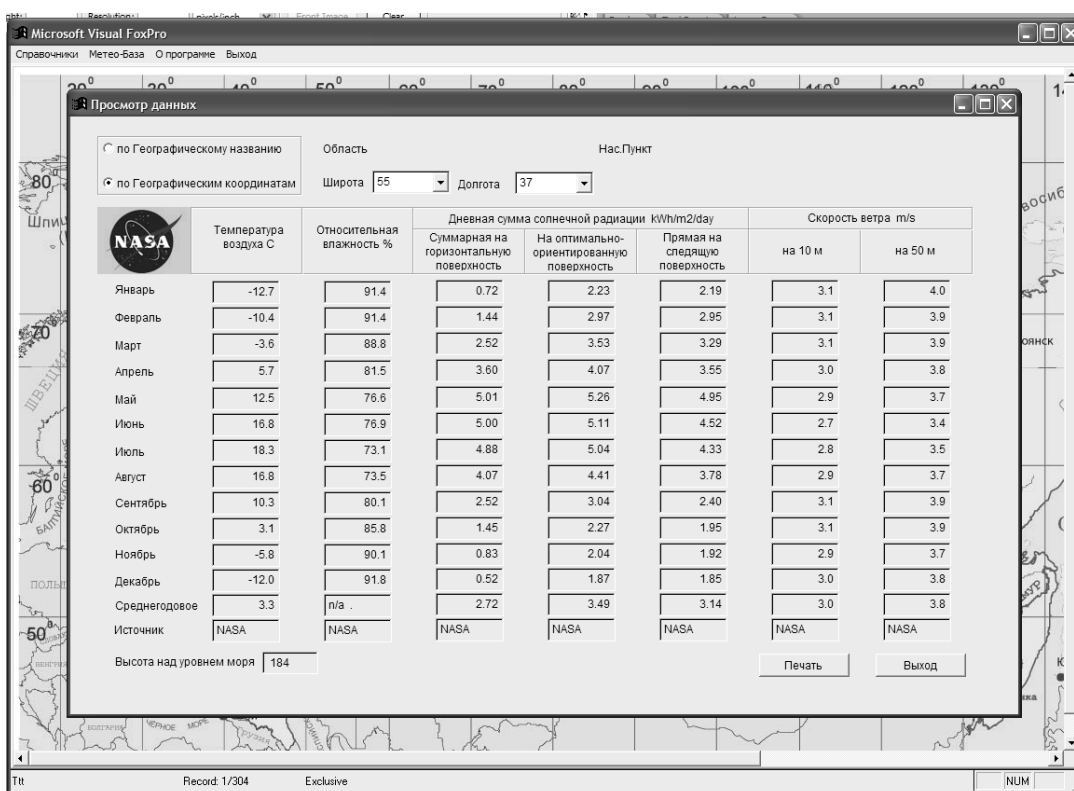


Рис. 20. Окно программы в режиме просмотра данных NASA SSE

При выводе данных в окно просмотра расчет среднегодовых значений параметров не производится, они выводятся только в том случае, если содержатся в соответствующей таблице базы.

Нажатию на кнопку «Печать» можно открыть окно предварительного просмотра печати (рис. 21), в котором можно просмотреть последовательно или сразу переходя на необходимую страницу подготовленную к выводу на печать форму для заданной географической точки. В меню предпросмотра можно также попасть непосредственно из пункта меню «Метео-база – Печать формы» (рис. 22), выбрав в форме широту и долготу необходимой точки.

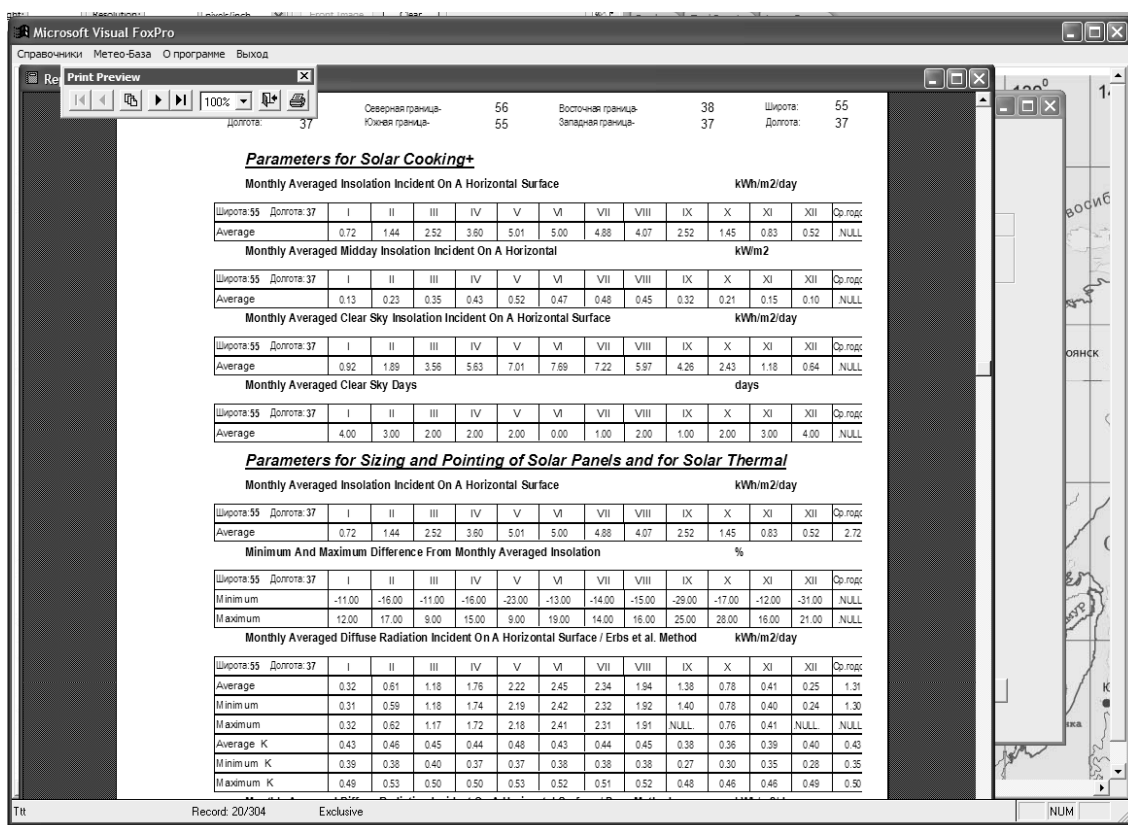


Рис. 21. Вид окна предпросмотра печати

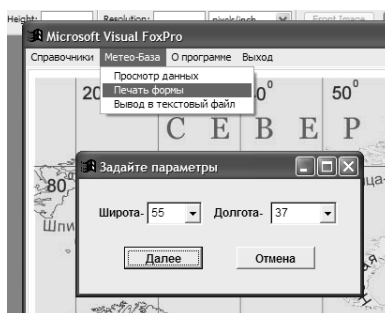


Рис. 22. Форма ввода широты и долготы для печати

В обоих случаях нажатие кнопки вывода на принтер открывает стандартный диалог выбора принтера и режима печати (рис. 23)

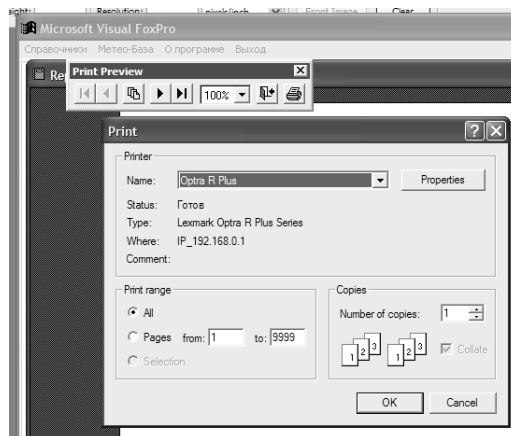


Рис. 23. Окно выбора принтера и режима печати

Для систематизации данных и построения карт тех или иных величин, в программе предусмотрена возможность вывода массивов информации в текстовые файлы через пункт меню «Вывод в текстовый файл» (рис. 24).

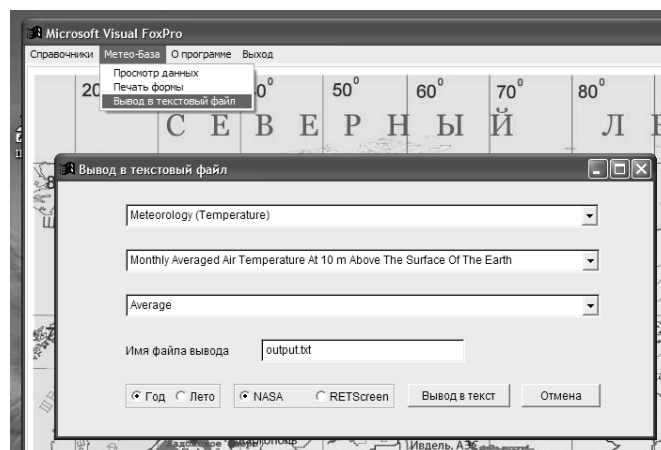


Рис. 24. Окно вывода данных в текстовый файл

В приведенной на рисунке 24 форме пользователь выбирает группу параметров, название таблицы в группе и строки в таблице, вводит имя файла и выбирает источник данных (NASA SSE или RETScreen). Данные выводятся в файл, содержащий для каждой точки широту, долготу, выводимую величину, осредненную за год, лето, теплое и холодное полугодия, а также среднемесячные значения величины, и располагающийся в папке txt.

3.2. Описание структуры базы климатической информации для территории России

База климатологической информации физически состоит из таблиц справочников: SPR0.DBF, SPR.DBF, SPR_NAME.DBF, STATE.DBF, PROVINCE.DBF и таблиц данных: GEOMETRY.DBF и METEO.DBF.

Справочник SPR0.DBF содержит информацию о тематическом делении данных, например, «Parameters for Solar Cooking», «Parameters for Sizing and Pointing of Solar Panels and for Solar Thermal Applications» и т.д. Описания полей справочника приведены в таблице 2.1.

Программа выдает на экран данные в виде таблиц, названия которых представлены в справочнике SPR.DBF (таблица 5), а названия строк – в справочнике SPR_NAME.DBF (таблица 6).

Таблица 4

Структура таблицы SPR0.DBF

№ п/п	Идентификатор поля	Тип и размер поля	Примечание
1	IDN_T	N(2)	Идентификационный номер
2	NAME_T	C(120)	Название темы

Таблица 5

Структура таблицы SPR.DBF

№ п/п	Идентификатор поля	Тип и размер поля	Примечание
1	NPP_T	N(3)	Идентификационный номер
2	IDN_T	N(2)	Порядковый номер темы
3	IDN2_T	N(2)	Порядковый номер в группировке
4	NAME_T	C(120)	Название таблицы
5	ED_IKM	C(10)	Единица измерения
6	NPP_IDNNAME	N(2)	Идентификационный номер в справочнике SPR_NAME
7	ANAME_T	C(10)	Идентификатор в данных NASA

Таблица 6

Структура таблицы SPR_NAME.DBF

№ п/п	Идентификатор поля	Тип и размер поля	Примечание
1	NPP_NAME	N(2)	Идентификационный номер
2	NAME	C(50)	Название строки в таблице
3	IDN	N(2)	Идентификационный номер группы наименований
4	IDN2	N(2)	Порядковый номер в группировке

Данные представлены двумя таблицами: GEOMETRY.DBF и METEO.DBF (таблицы 7 и 8). В таблице GEOMETRY.DBF собраны координаты географических точек и некоторые данные по ним, в частности высота над уровнем моря и источник полученных данных, в базах представлены данные из базы спутниковых наблюдений NASA SSE и доступная информация о наземных измерениях климатических параметров из базы данных RETScreen International. Основная ежемесячная и годовая климатическая информация представлена в таблице METEO.DBF. Структура баз данных позволяет в дальнейшем дополнять их информацией из других источников без ущерба уже содержащейся в базах.

Таблица 7

Структура таблицы GEOMETRY.DBF

№ п/п	Идентификатор поля	Тип и размер поля	Примечание
1	NPP_COORD	N(10)	Порядковый номер координат географической точки
2	NORTH	C(6)	Значение северной координаты
3	WEST	C(6)	Значение западной координаты
4	LATCENTER	C(6)	Название таблицы
5	LONCENTER	C(6)	Единица измерения
6	EAST	C(6)	Значение восточной координаты
7	SOUTH	C(6)	Значение южной координаты
8	LAT	C(10)	Значение широты
9	LON	C(10)	Значение долготы
10	ELEVATION	C(6)	Высота над уровнем моря
11	ID_PROVINCE	N(10)	Идентификационный номер в таблице PROVINCE.DBF
12	ID_STATE	N(10)	Идентификационный номер в таблице STATE.DBF
13	PRIZ	N(1)	Признак источника данных: 0 – NASA, 1 – RETScreen

Справочники STATE.DBF и PROVINCE.DBF (таблицы 9 и 10) использованы для привязки конкретной географической точки к географическому названию с учетом административно-территориального деления на карте мира.

Структура таблицы METEO.DBF

№ п/п	Идентификатор поля	Тип и размер поля	Примечание
1	NPP_COORD	N(10)	Порядковый номер координат географической точки
2	NPP_T	N(3)	Идентификационный номер в справочнике SPR.DBF
3	M _i , i = 1 ÷ 12	N(10,4)	Данные за январь, февраль и т. д.
4	M13	N(10,4)	Данные за год
5	NPP_NAME	N(2)	Идентификационный номер группы наименований в SPR_NAME.DBF
6	PRIZ	N(1)	Признак источника данных: 0 – NASA, 1 – RETScreen

Таблица 9

Структура таблицы STATE.DBF

№ п/п	Идентификатор поля	Тип и размер поля	Примечание
1	ID	N(10)	Идентификационный номер
2	COUNTRY	N(10)	Идентификационный номер государства или области
3	NAMESHOW	C(50)	Название

Таблица 10

Структура таблицы PROVINCE.DBF

№ п/п	Идентификатор поля	Тип и размер поля	Примечание
1	ID_STATE	N(10)	Идентификационный номер в справочнике STATE.DBF
2	ID	N(10)	Идентификационный номер
3	STNNAME	C(50)	Название
4	LAT	C(10)	Широта
5	LON	C(10)	Долгота

Заключение

Представленные в настоящем учебном пособии материалы представляют собой результат обобщения и статистической обработки большого объема климатической информации, полученной на сети метеорологических станций и содержащейся в метеорологической базе данных NASA SSE, созданной на основе долговременных спутниковых наблюдений за поверхностью Земли.

Выполненный анализ данных NASA SSE и сравнение их с данными наземных метеостанций, проведенный для территории Российской Федерации показали возможность использования обобщенного массива данных для построения карт распределения элементов солнечного и ветрового потенциала по территории России, а также в качестве исходных данных для численного моделирования и оптимизационных расчетов установок, использующих солнечную и ветровую энергию.

Созданная локальная электронная базы данных, содержит климатическую информацию для территории России, включая данные по солнечной радиации на различным образом ориентированные в пространстве неподвижные поверхности и на следящую за Солнцем поверхность, по скоростям ветра на высотах 10 и 50 м, по температуре окружающей среды и по относительной влажности воздуха для ячеек территории с размерами $1^\circ \times 1^\circ$ широты и долготы, а также многолетние усредненные данные наземных метеостанций.

Представленный материал, включая электронную базу данных, ориентирован на широкий круг специалистов, в том числе студентов и аспирантов географических факультетов вузов, разработчиков и потенциальных пользователей солнечных, ветровых и комбинированных установок; а также представляет практический интерес для архитекторов и специалистов в области строительной теплофизики.

Литература

Атлас энергетических ресурсов СССР. Т.1, Ч.3. Гидроэнергетические, ветроэнергетические, гелиоэнергетические ресурсы. 1935.

Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. – М.: ГНУ ВИЭСХ РАСХН, 2005. 264 с.

Борисенко М.М., Стадник В.В. Атласы ветрового и солнечного климатов России. СПб.: Изд-во ГГО им.А.И.Воейкова, 1997.

Летопись погоды, климата и экологии Москвы (по наблюдениям Метеорологической обсерватории МГУ) Вып.1 – 2000 г. М.: Изд-во географического ф-та МГУ. 2002.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1990.

Пивоварова З.И. Радиационные характеристики вычислений. – Л.: Гидрометеиздат. 1977. 335 с.

Пивоварова З.И., Стадник В.В. Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 291 с.

Попель О.С., Фрид С.Е. Эффективность использования индивидуальных солнечных водонагревательных установок в различных регионах России и Европы // Препринт ИВТАН № 3-467. Москва. 2002. 41 с.

Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г. Анализ показателей эффективности использования солнечных водонагревательных установок // Сантехника, отопление, кондиционирование (С.О.К.). 2004. №4. С. 104-109. 2004. №5. С. 28-32.

Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г. Методика оценки эффективности использования солнечных водонагревательных установок в климатических условиях Российской Федерации. – М.: Из-во МФТИ. 2004. 31 с.

Расчет ресурсов солнечной энергетики // В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, С.В. Кривенкова, В.А.Кузнецова, Н.К. Малинин. Под ред. В.И. Виссарионова – М.: Изд-во МЭИ. 1998. 61с.

Рекомендации по определению климатических характеристик гелиоэнергетических ресурсов на территории СССР. – Л.: Гидрометеиздат. 1987. 31 с.

Справочник по климату СССР. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – Л.: Гидрометеиздат, 1967.

Справочник эколого-климатологических характеристик г. Москвы (по данным Метеорологической обсерватории МГУ). Том 1. Солнечная радиация, солнечное сияние. Метеорологические элементы и явления. Характеристики пограничного слоя атмосферы. – М.: Изд-во Моск. Ун-та. 2003. С. 35-87

Стадник В.В. Районирование территории СССР по характеристикам изменчивости солнечной радиации. – В кн.: Материалы XII Совещания по актинометрии. Использование актинометрической информации для нужд народного хозяйства. Иркутск. 1984. С. 90-93.

Стадник В.В. Статистические характеристики суточных сумм суммарной радиации. – Труды ГГО. 1983. Вып. 475. С. 61-68.

Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Ч.1. – Л.: Гидрометеиздат. 1978. С. 108-133.

Erbs, D. G., Klein S. A., Duffie J. A. Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly average Global Radiation. // *Solar Energy*. 1982. V. 28, No. 4. PP. 293-302.

Pinker, R. T., Laszlo I. Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Application on a Global Scale. // *Journal of Applied Meteorology*. 1992/ V. 31. PP. 194-211.

RETScreen International. Renewable energy decision support center. // 2009. [http:// www.etscreen.net](http://www.etscreen.net).

Smith, G. L., Wilber A. C., Gupta S. K., Stackhouse P. W. Surface Radiation Budget and Climate Classification. // *Applied Optics*. 2002. V. 15. PP. 1175-1188.

The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set // 2009. [http:// eosweb.larc.nasa.gov/sse/](http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/).