

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 аккумуляторов энергии. Как отмечалось выше, из-за относительно малых плотностей энергетических потоков солнечного излучения и ветра у поверхности земли площадь приемников этих первичных источников энергии может быть велика, и приемники могут вносить в стоимость всей установки определяющий вклад. Нестабильность (суточная, сезонная, погодная) 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 продолжительными) измерениями на месте;
- многолетними измерениями по единой методике на метеостанциях, результаты которых аккумулированы в климатических справочниках и 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 [4].

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 метеорологиче-

ских наблюдений на метеостанциях. В СССР основными источниками актинометрических данных для специалистов-гелитехников являлись многотомные справочники по климату СССР, ставшие результатом труда многочисленных коллективов региональных и центральных организаций, занимающихся проблемами метеорологии и климата [1, 5]. 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 [6].

В СССР работы по составлению Атласа гелиоэнергетических ресурсов страны проводились, начиная с 1920-х годов [7]. При этом уже в ранних работах отмечалось, что «невозможно раз и навсегда составить солнечный кадастр той или иной террито-

рии 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 использования возобновляемых источников энергии и рационального природопользования продолжают оставаться важными вопросы определения потенциала ресурсов солнечной энергии для территории России.

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 в другие виды энергии. Как известно, энергия солнечной радиации, поступающая 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, изображено на рис. 2. Поскольку

Земля движется вокруг Солнца по эллиптической орбите и расстояние между ними в течение года непостоянно, приход солнечной энергии в течение года изменяется от $1,349 \text{ кВт/м}^2$ (в начале июля) до $1,443 \text{ кВт/м}^2$ (в начале января).

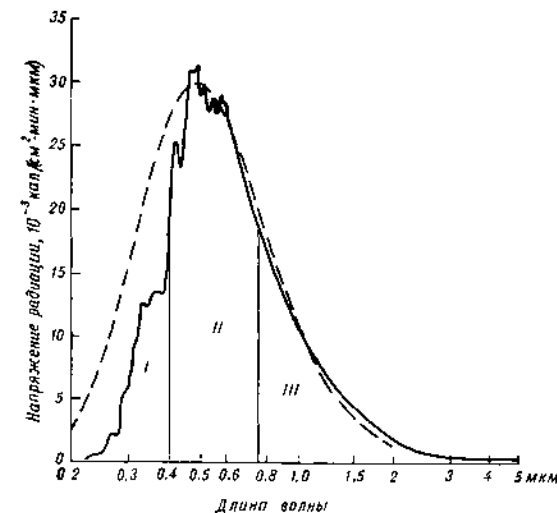


Рис. 2. Распределение энергии в спектре Солнца и в спектре черного тела при 6000°K (пунктир) [8]

Если на поверхность Земли солнечные лучи падают под углом ξ к вертикали, то на 1 м^2 за 1 с поступает поток энергии

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

где r_0/r — отношение среднего радиуса земной орбиты к текущему расстоянию от Земли до Солнца. Величину I' называют инсо-

ляцией, или прямой падающей солнечной радиацией. Поскольку $\cos \zeta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$, 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:

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

где τ – продолжительность суток. 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, таким образом, 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. При $\varphi \geq 66^\circ 33'$ (полярный круг) солнечное излучение зимой подолгу вовсе не поступает на земную поверхность, в то время как летом W там больше, чем на экваторе.

На количество солнечной энергии, падающей 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 излучения 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 $h = 0$

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

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, поступившей 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).

Как и для горизонтальной поверхности, суточная облученность W , то есть полная энергия солнечного излучения, которая приходит 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 солнечный 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 оптимальные азимут и угол наклона солнечного приемника 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

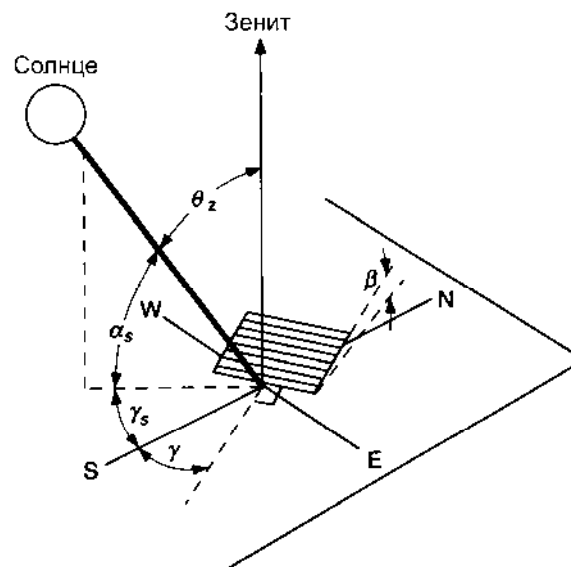


Рис. 3. Характеристики ориентации поверхности солнечного приемника:

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.

широте местности; для установок, работающих лишь в теплое время года он на $10...15^\circ$ меньше, а в холодное, соответственно, больше широты.

1.2. КОМПЛЕКС СТАНДАРТНЫХ АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Измерение потоков солнечного излучения производится пиргелиометрами, актинометрами и пиранометрами⁴. На метео-

⁴ Пиргелиометр (от греч. *пύρ* – огонь, *hēlios* – 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. *пύρ* – огонь, *άνω* – 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.

станциях России (и ранее – СССР), на которых проводятся наблюдения за составляющими радиационного баланса, используется как стандартная аппаратура, так и приборы, разработанные и исследованные в геофизических обсерваториях [9]. Однородность рядов актинометрических данных обеспечивается использованием однотипных приборов и их тщательной градуировкой, а также одинаковой методикой измерений и обработки данных. В качестве 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 не

солнечного излучения, падающего на перпендикулярную солнечным лучам поверхность. Пиргелиометр в основном применяется для проверки относительных приборов – актинометров. Пиранометр (от греч. *пύρ* – огонь, *άνω* – 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.

способствует массовому применению. В последние годы специалистами ГГО им. А.И. Воейкова совместно с белорусским ОАО «Пеленг» разработан комплект актинометрических средств измерений, являющихся модификацией приборов конструкции Ю.Д. Янишевского, проведены их испытания в Госстандарте РФ [10]. Выпуск приборов начат ОАО «Пеленг».

Ежемесячно актинометрические приборы поверяются по контрольному актинометру, который в свою очередь, каждые 1...2 года градуируется по Российскому эталону (пиргелиометру 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 базы данных.

Исчерпывающим набором измеряемых актинометрических величин, дающих основу для оценки потенциала солнечной энергии, является следующий [11]:

1. Солнечное сияние:

- Продолжительность солнечного сияния.

- Параметры временного распределения месячной и годовой продолжительности солнечного сияния.

2. Составляющие радиационного баланса:

- Часовые суммы прямой солнечной радиации, поступающей на нормальную к лучу поверхность при средних условиях облачности.

- Часовые суммы прямой солнечной радиации, поступающей 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, поступающей 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, поступающей на нормальную к лучу поверхность.

- Средние, максимальные и минимальные месячные и годовые суммы прямой, рассеянной, отраженной, поглощенной и суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, а так-

же параметры временного распределения этих величин (среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса).

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

Важным для оценки потенциала солнечной энергии и прогноза его изменения 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 на 4...6% выше, 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. уменьшились 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 временных рядов годовых сумм составляющих радиационного баланса за 1958–2001 гг. показал наличие тенденции к уменьшению (4%) прямой, рассеянной и суммарной радиации, поступающих на горизонтальную поверхность (рис. 4).

Основной причиной уменьшения поступления солнечной энергии является увеличение общей и нижней облачности, связан-

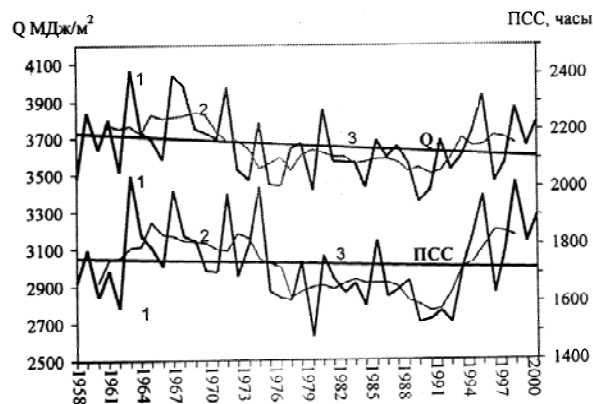


Рис. 4. Годовые суммы (1) суммарной радиации (Q), продолжительности солнечного сияния (PСС) и их пятилетние скользящие средние (2).
3 – линия тренда

ное 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 величины составило соответственно 19 и 14%. Отмечается существенная (15%) тенденция к уменьшению годовых сумм отраженной радиации, обусловленная в основном неустойчивостью отражательных свойств снежного по-

крова 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.

1.3. ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕМЕННОЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАДАЮЩЕЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Исчерпывающее описание на основе данных наземных измерений радиационного режима, 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 репрезентатив-

ности актинометрических станций. Поэтому интерполяция и экстраполяция актинометрических данных – важная 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 [12],

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 [12], 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 регистрации самописцами, 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 [13].

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. Однако экстремумы не являются фиксированными значениями и зависят от объема выборки. Абсолютный максимум и минимум характеризует наибольший и наименьший приход радиации за весь период наблюдений. Для получения достоверных абсолютных значений экстремумов необхо-

димо наличие достаточно длинных рядов. Анализ распределения средних суточных максимумов суммарной радиации по территории европейской части России (по данным наземных актинометрических измерений) 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}) характеризуют межгодовую изменчивость, отклонения суточных сумм (σ_1) – межсуточную. Последняя по данным актинометрических станций в 3...4 раза больше межгодовой. Исследования показали, что по территории России средние квадратичные отклонения месячных и су-

точных 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 и среднего многолетнего – 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 [12, 13], 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 состоит в том, что они выражают основные особенности эмпирических распределений и позволяют рассчитать параметры аналитического выражения при аппроксимации распределений.

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 значениях $|A| \geq 0,4$ и $|E| \geq 0,8$, т.е. равных или больших тройной ошибки их определения, можно предположить, что распределение существенно отличается от нормального.

Средние многолетние суммы, как отмечено выше, являются необходимыми, но недостаточными энергетическими характеристиками солнечной радиации. В работах по оценке обеспеченности территории СССР ресурсами солнечной энергии [13, 14] проводился анализ статистических характеристик суточных сумм суммарной солнечной радиации в целях районирования территории страны по типам распределения. Для их идентификации использовались коэффициенты асимметрии и эксцесса, их сочетания, суточные суммы суммарной радиации и их изменчивость. Было выделено шесть характерных для территории СССР типов распределения [15]: 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).

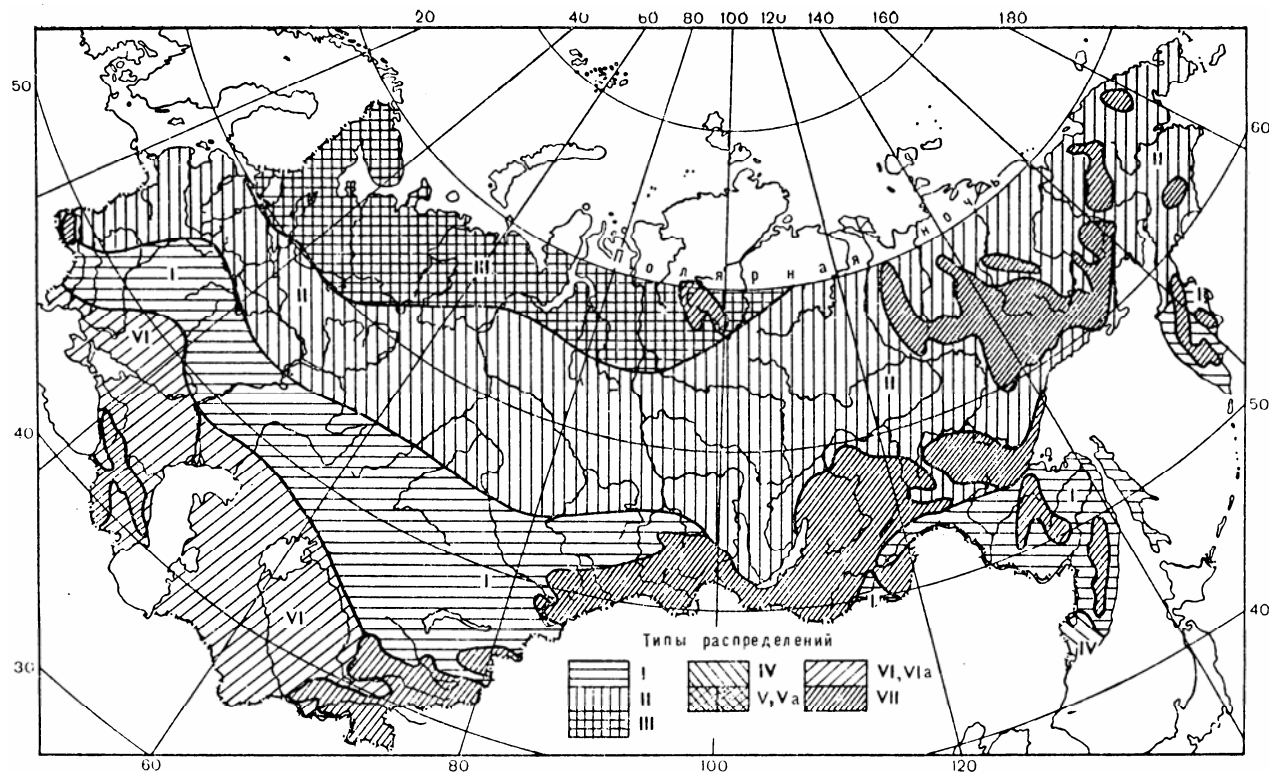


Рис. 5. Районирование территории СССР по типам распределения суточных сумм суммарной солнечной радиации. Январь.

Типы распределения: I – нормальное; II – положительно асимметричное; III – положительно асимметричное, островершинное; IV – отрицательно асимметричное; V – отрицательно асимметричное, островершинное; VI – бимодальное; VII – горные районы

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 автоматическом контроле качества метеорологических наблюдений и др. Обычно определение средней по площади климатической характеристики сводится к ее осреднению по выбо-

рочной 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 гг.) 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).

Как один из методов решения проблемы недостаточности актинометрических данных в [13] 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 [5]. Были построены карты (масштаб 1:7500000) для четырех месяцев (январь, апрель, июль, октябрь), причем каждая карта была разбита на 5-градусные трапеции (144 трапеции к югу от 70°с.ш.)⁵. Величина про-

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).

должительности 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 точки, 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. По оценке [13] 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 ин-

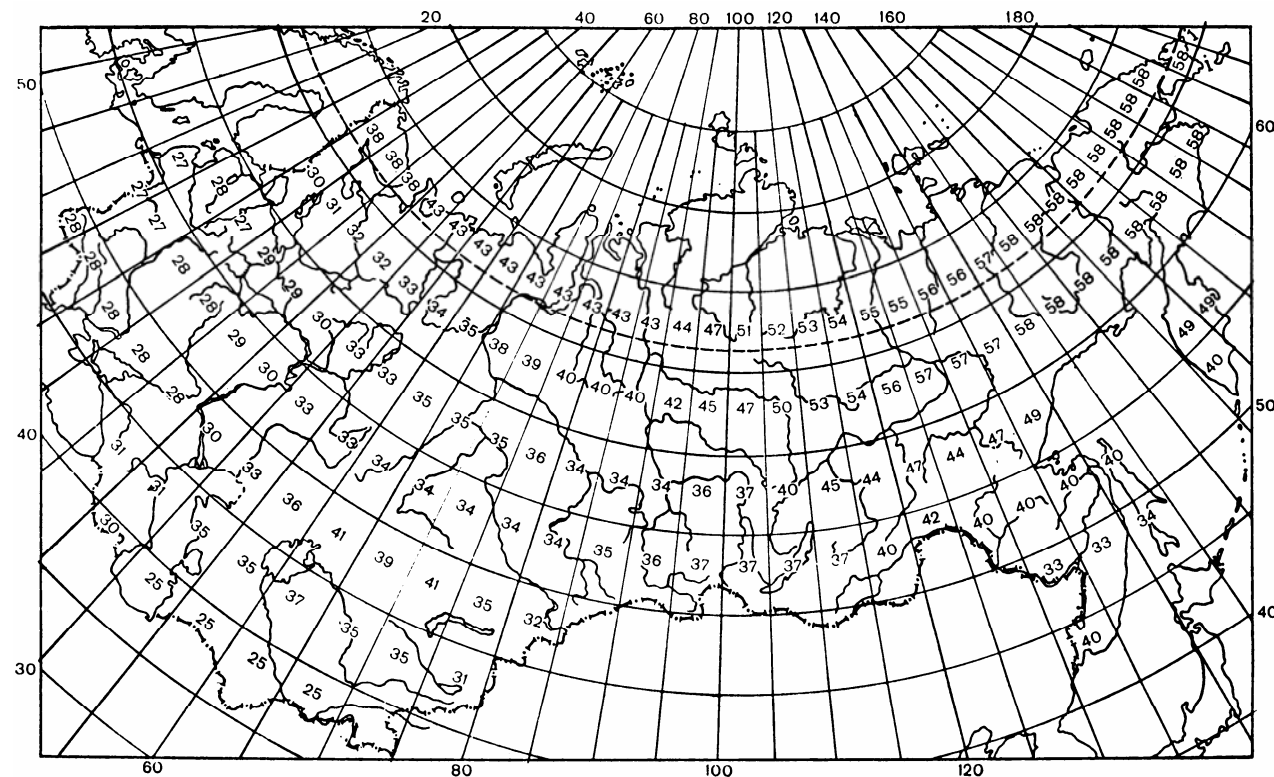


Рис. 6. Средняя многолетняя месячная сумма суммарной солнечной радиации по площади 5-градусных трапеций (МДж/м²). Апрель

терполяции 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 [13]:

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

Для пункта, удаленного от метеостанции на 200 км, погрешность составит соответственно 0,8...1,5 и 4,6...4,8 МДж/м² за сутки. Для 300 км эти цифры возрастут уже для условий июля до 6,1...6,5 МДж/м² за сутки. Указанные погрешности были сопоставлены со значениями суточных сумм суммарной радиации, полученными из дан-

ных актинометрических измерений, проводимых в Метеообсерватории МГУ им. М.В.Ломоносова. При средних значениях суточных сумм суммарной солнечной радиации в январе $1,98 \text{ МДж/м}^2$ (период осреднения 1958...2000 гг.) ошибки экстраполяции на 100 км составляют 30...45%, на 200 км – 40...75%. Средние значения сумм суммарной суточной солнечной радиации за июль в тот же период осреднения составили $18,9 \text{ МДж/м}^2$, 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 гелиоустановки, 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 значения погрешностей экстраполяции осредненных за месяц суточных сумм суммарной радиации 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 [13], 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 среднемесячных суточных сумм.

Таблица 1

Ошибки 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 страны 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 с однородными условиями подстилающей поверхности и прозрачности атмосферы, расположенные в пределах 50...130 км. 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 загрязненности 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 (до 1980 г). Приход суммарной солнечной радиации при безоблачном небе зависит от широты места, высоты солнца, прозрачности атмосферы и состояния подстилающей поверхности. Видно, что 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. Кроме того, на отклонение изолиний от широтного распределе-

ния в значительной степени влияет прозрачность 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.

При районировании территории бывшего СССР на основе полученных данных [12] материковая часть территории СССР, расположенная южнее 70° с.ш. делилась на 10-градусные широтные зоны, которые для учета зональности 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 многолетний режим, изменчивость и особенности суточного хода солнечной радиации:

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

2. В качестве второго показателя для каждого района взято отношение годовой суммы прямой радиации, приходящей на

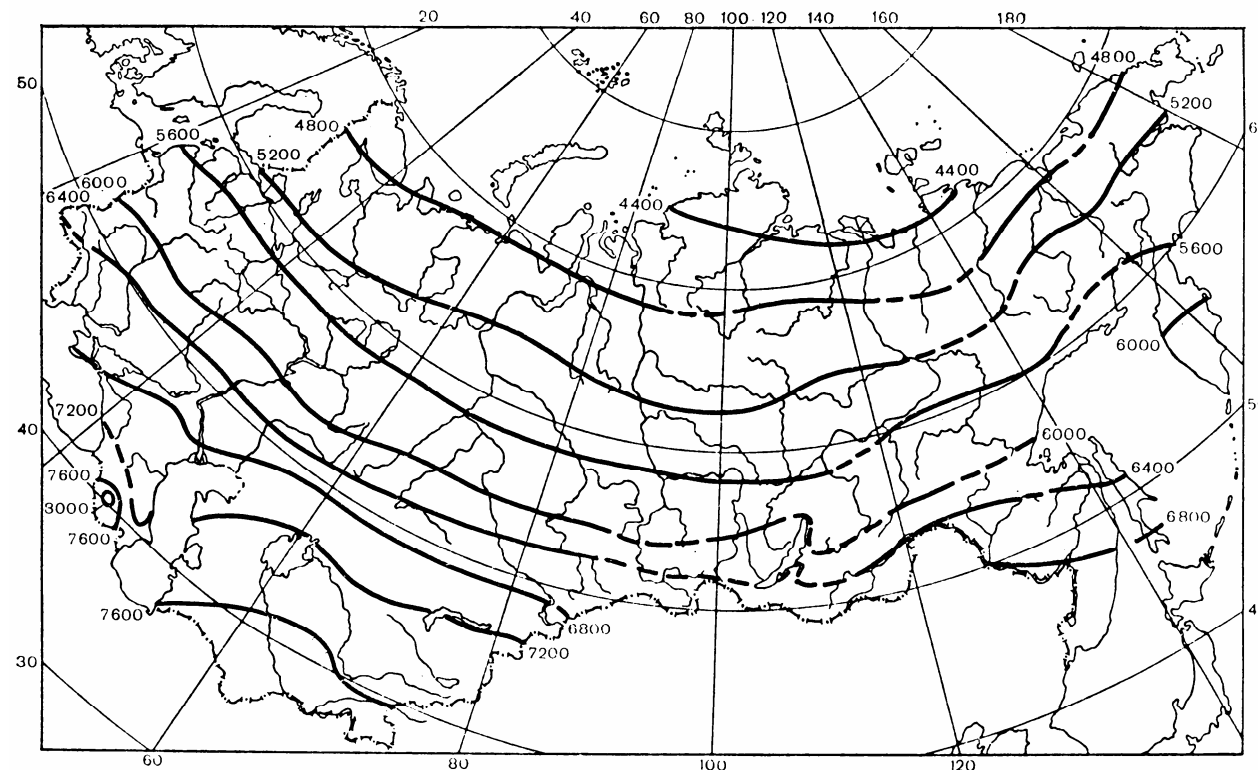


Рис. 7. Средняя многолетняя годовая сумма суммарной солнечной радиации при безоблачном небе (МДж/м²) [2]

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 следуют следующим образом: отрицательно асимметричное островер-

шинное, отрицательно асимметричное, нормальное, бимодальное, положительно асимметричное, положительно асимметричное островершинное.

4. Число часов суммарной радиации со средней часовой мощностью более 600 Вт/м² в годовой совокупности многолетних суточных сумм солнечного излучения выбрано в качестве четвертого показателя для учета

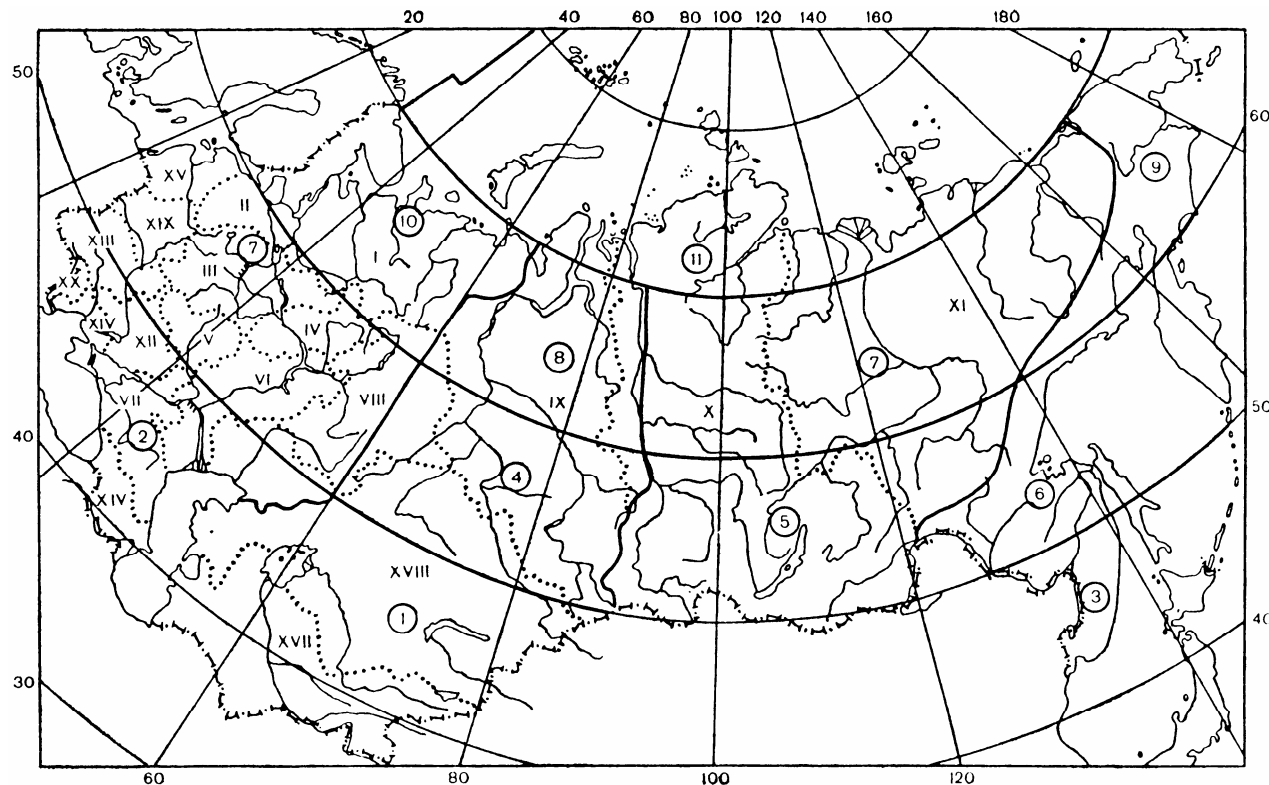


Рис. 8. Районирование территории СССР по потенциалу солнечной радиации.

Цифра в кружке – номер района по приоритету потенциала, римская цифра – номер экономического района, точки – границы районов.

особенностей суточного изменения энергетического уровня радиации [14].

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

Ранжирование районов по обеспечению ресурсами солнечного излучения с учетом

веса выбранных показателей выполнялось с использованием алгоритма [16]. По результатам расчетов районам были присвоены номера в соответствии с приоритетом потенциала солнечной энергии (рис. 8).

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 райони-

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