

24.04.89



P.97
1989

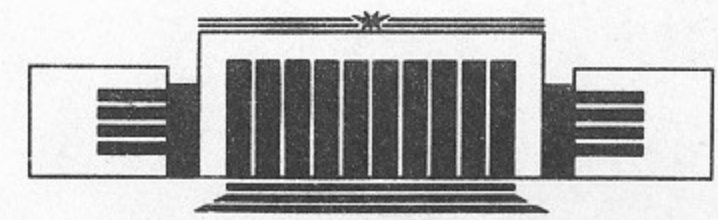
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Д.Д. РЮТОВ

**СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
И «ТЕПЛОВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ»
АТМОСФЕРЫ**

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО АН СССР
ИНВ. № 1315

ПРЕПРИНТ 89-6



НОВОСИБИРСК

Солнечная энергетика
и «тепловое загрязнение» атмосферы

Д.Д. Рютов

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Сравнивается возможное влияние солнечной энергетика и других видов энергетика (атомной, термоядерной), не связанных с загрязнением атмосферы углекислым газом, на тепловой баланс Земли. Вопреки распространенному мнению, делается вывод о том, что солнечная энергетика не имеет особых преимуществ в смысле возможности исключения эффектов «теплового загрязнения». Обсуждаются способы сохранения теплового баланса атмосферы, основанные на использовании отражающих (или поглощающих) покрытий территорий, прилегающих к энергетическим установкам. Отмечается, что сохранение теплового баланса такими средствами в средних и высоких широтах практически невозможно. Указывается, что облегчить ситуацию можно путем переноса наиболее энергоемких производств в зону пустынь.

Solar Energy and
«Thermal Pollution» of the Atmosphere

D.D. Ryutov

Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, USSR

АБСТРАКТ

The comparison is made of the future Solar power plants and the fusion and fission power plants with respect to their influence on the thermal balance of the Earth. Despite the wide spread opinion, the conclusion is made that the Solar energy doesn't have any particular advantages in this context. The ways are discussed of maintaining the thermal balance of the atmosphere by using the reflecting (or absorbing) coatings at the territories surrounding the power plants (situated in the desert zone). It is noted that such ways of maintaining the thermal balance are impractical for medium and high latitudes. This difficulty can be alleviated by moving the largest power consuming industrial enterprises into desert zones.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

Эта заметка основана на выступлении автора на новогоднем семинаре ИЯФ, чем и оправдывается выбор материала, относящегося, скорее, к области научной фантастики, чем к «стандартной» тематике Института.

Когда речь идет о перспективах роста производства и потребления энергии на Земле, то в качестве одной из трудностей, с которыми человечеству придется столкнуться в будущем, называется «тепловое загрязнение» атмосферы — нагрев ее теплом, выделяемым энергетическими установками. Эффект особенно неприятен, когда установки концентрируются на небольшой площади.

Широко распространено мнение, что от проблем, связанных с тепловым загрязнением, свободна солнечная энергетика, и что эта особенность является чуть ли не внутренне присущим ей свойством. По этому признаку часто проводится противопоставление солнечной и других видов энергетика, и делается вывод, что только солнечная энергетика сможет удовлетворить растущие энергетические потребности человечества.

Не возражая против того, что солнечная энергетика, в принципе, может иметь интересные перспективы, автор в то же время хотел бы показать, что в отношении эффектов теплового загрязнения она не имеет особых преимуществ по отношению к другим видам энергетика, так что выбор будет определяться, в конечном итоге, экономическими соображениями.

Следует заранее оговориться, что в заметке рассматриваются только такие виды энергетика, которые не связаны с крупномасштабными выбросами углекислого газа в атмосферу, и поэтому не затрагивается вопрос о парниковом эффекте.

Традиционно и, по-видимому, оправданно считается, что солнечные энергетические установки следует размещать в районах

пустынь, для которых характерны большие интегральные потоки излучения за год. Если говорить о проблемах Советского Союза, то речь должна идти, по-видимому, о пустынях Средней Азии. При этом, чтобы удовлетворить заметную (скажем, 50%) долю прогнозируемых на начало следующего тысячелетия потребностей страны в энергии, солнечными преобразователями и вспомогательными устройствами следует покрыть десятки тысяч квадратных километров территории. Нарушение теплового баланса на столь больших площадях в самом деле может стать источником серьезных неприятностей, и вопрос о тепловом загрязнении здесь действительно важен.

Пусть для размещения энергетических установок выделена некоторая территория площади S . Начнем с рассмотрения теплового баланса в «естественных» условиях, до фактического размещения установок. Будем для простоты считать, что атмосфера прозрачна для солнечного излучения (в том числе для отраженного от поверхности пустыни). Альbedo поверхности пустыни обозначим через α , плотность падающего потока солнечного излучения — через q . Тогда на единице площади пустыни в единицу времени выделяется тепловая мощность

$$Q = q(1 - \alpha). \quad (1)$$

Эта мощность уносится конвекцией и лучистой теплопроводностью в инфракрасной области. Разумеется, q и α меняются в течение суток и от сезона к сезону, но мы будем считать их замененными на некоторые усредненные по году значения. Конечно, наша модель — очень грубая (предположение о прозрачности атмосферы, использование усредненных значений q и α), но общее представление о тепловом балансе все же дает.

По литературным данным, альbedo поверхности пустынь лежит в диапазоне от 0,2 до 0,45. Мы, в качестве реперного, будем пользоваться значением

$$\alpha = 0,3. \quad (2)$$

Рассмотрим тепловой баланс после размещения солнечных преобразователей^{*)}. Остановимся сначала на случае, когда преобразователи с альbedo α_n покрывают всю площадь S , а произведенная

^{*)} Ими могут быть как фотоэлектронные, так и тепловые преобразователи (см. [1]).

ими энергия потребляется «на месте», в пределах площади S . Потребляющие энергию объекты будем считать «точечными» (т. е. занимающими пренебрежимо мало места) и не влияющими на альbedo территории. В этом случае вся принятая преобразователями мощность солнечного излучения $q(1 - \alpha_n)S$ преобразуется в тепло в пределах площади S . При этом несущественно, каков коэффициент полезного действия преобразователей: вся «полезная» мощность все равно переходит в тепло^{*)}.

В отличие от (1) теперь получаем, что количество тепла, выделяемое на единице площади в единицу времени, равно

$$Q = q(1 - \alpha_n). \quad (3)$$

Из сравнения (1) и (3) видно, что при $\alpha_n = \alpha$ тепловой баланс территории остается прежним, т. е. не происходит ни ее перегрева, ни переохлаждения. По-видимому, на этом и основывается мнение, что солнечная энергетика не связана с тепловым загрязнением. Между тем, уже тот факт, что только при одном определенном значении α баланс не нарушается, говорит о том, что отсутствие тепловых загрязнений отнюдь не является внутренним свойством солнечной энергетика.

Поскольку солнечные преобразователи — относительно сложные и дорогостоящие устройства, из экономических соображений желательно, чтобы они «усваивали» как можно большую часть падающей на них солнечной энергии, т. е. чтобы их альbedo α_n было как можно меньше: при фиксированном КПД преобразования полезная мощность, снимаемая с единицы площади, пропорциональна $1 - \alpha_n$. Но при $\alpha_n < \alpha$, как видно из сравнения (1) и (3), нарушается тепловой баланс поверхности. Выправить ситуацию можно, заняв преобразователями с $\alpha_n < \alpha$ только некоторую долю ξ площади S , и покрыв остальную часть площади (т. е. $S(1 - \xi)$) пассивными отражателями с альbedo $\alpha_k > \alpha$, наличие которых компенсировало бы избыточное поглощение преобразователями (индекс «к» соответствует слову «компенсация»). В этом случае (в среднем по площади S) на единице площади переходит в тепло мощность

^{*)} В рамках современных массовых технологий доля энергии, перешедшая не в тепло, а в конечный продукт (например, в энергию деформации материала изделий, произведенных штамповкой), пренебрежимо мала, особенно при учете различных «накладных» расходов.

$$Q = q - \xi \alpha_n q - (1 - \xi) \alpha_k q. \quad (4)$$

Из сравнения (1) и (4) видно, что тепловой баланс не нарушается при

$$\xi = \frac{\alpha_k - \alpha}{\alpha_k - \alpha_n}, \quad (5)$$

так что использование преобразователей с $\alpha_n < \alpha$ возможно, но требует нанесения компенсирующих покрытий на часть площади S , занятой энергетической системой. Поскольку пассивные отражающие поверхности наверняка существенно дешевле преобразователей, такой подход кажется целесообразным.

Полная (тепловая) мощность энергетической системы, развернутой на площади S , будет равна

$$P_c = qS(1 - \alpha_n)\xi = qS(1 - \alpha_n) \frac{\alpha_k - \alpha}{\alpha_k - \alpha_n}. \quad (6)$$

Максимальное ее значение достигается при $\alpha_n \rightarrow 0$, $\alpha_k \rightarrow 1$ и равно

$$P_{c \text{ макс}} = qS(1 - \alpha), \quad (7)$$

т. е. совпадает с (1).

Покажем теперь, что тепловой баланс площади S можно сохранить, размещая на ней другие (не солнечные) энергопроизводящие установки, например (речь идет о XXI веке!), термоядерные реакторы. Эти объекты мы также будем считать точечными и более или менее равномерно распределенными по площади S . Устройства, потребляющие произведенную энергию, будем, как и прежде, считать размещенными в пределах S . В этом случае вся тепловая мощность $P_{т-я}$, вырабатываемая термоядерными станциями, выделяется на площади S . Очевидно, что для сохранения теплового баланса территории ее следует покрыть пассивными отражателями с альбедо $\alpha_k > \alpha$. В этом случае на единице площади будет выделяться тепловая мощность

$$Q = \frac{P_{т-я}}{S} + q(1 - \alpha_k). \quad (8)$$

Сравнивая (8) и (1), находим, что тепловой баланс можно сохранить и в этом случае: для этого мощность термоядерных реакторов должна составлять

$$P_{т-я} = qS(\alpha_k - \alpha). \quad (9)$$

Максимальная мощность, которую можно производить (и потреблять) на площади S без нарушения теплового баланса, соответствует $\alpha_k \rightarrow 1$ и равна

$$P_{т-я \text{ макс}} = qS(1 - \alpha). \quad (10)$$

Эта величина в точности совпадает со значением (7).

Таким образом, избежать теплового загрязнения можно при использовании как солнечной, так и других видов энергетики. Вопрос о том, что выгоднее: покрыть 70% (при $\alpha = 0,3$) площади S солнечными преобразователями, а 30% — компенсирующими отражателями, или разместить на ней некоторое количество термоядерных установок, покрыв всю площадь пассивными отражателями, — есть чисто экономический вопрос. Поскольку в качестве пассивного отражателя можно использовать первичную поверхность пустыни, обработанную тем или иным способом, то стоимость отражателя может быть сделана, по-видимому, очень низкой.

Если требования потребителей энергии будут состоять в поддержании примерно постоянного во времени уровня потребления, то при выполнении соотношений (6) или (9), обеспечивающих тепловой баланс в среднем по году, будет возникать суточный и, что более серьезно, сезонный дисбаланс. Эта проблема в равной мере относится как к термоядерной, так и к солнечной энергетике, причем в последнем случае дело осложняется необходимостью создания аккумуляторов энергии, выработанной в более благоприятные сезоны. Конкретных способов решения этой проблемы пока не видно.

Рассмотрим теперь, как изменится ситуация, если энергия производится на той же площади S (в зоне пустынь), а потребляется в различных районах средних и высоких широт. Здесь существенным становится КПД энергетических установок η — мы будем определять его как отношение мощности \bar{P} , переданной в зону потребления, к полной тепловой мощности энергетической системы (P_c или $P_{т-я}$). Потерями при передаче будем пренебрегать.

Поскольку переданная из зоны производства энергия в конечном итоге переходит в тепло, то, если заботиться только о глобальном энергодолге, условие его сохранения будет по-прежнему определяться соотношениями (6) и (9). При этом, конечно, в зонах производства и потребления, взятых по отдельности, баланс

нарушится: в пустыне похолодает, а на Севере*) потеплеет. Само по себе это вовсе не означает улучшения условий жизни на Земле и, напротив, может быть источником серьезных неприятностей, особенно в зоне пустынь, где воздействие будет очень «концентрированным».

Выясним поэтому, нельзя ли сохранить условия теплового баланса не только в целом, но и в каждой из двух зон в отдельности. Начнем с зоны производства. Сохраняя прежние обозначения и замечая, что из зоны производства удаляется мощность $qS\xi(1-\alpha_n)\eta$, которую нужно вычесть из (4), получаем вместо (4)

$$Q = q - q\xi\alpha_n - q(1-\xi)\alpha_k - q(1-\alpha_n)\xi\eta. \quad (11)$$

Сравнивая это с (1), находим условие баланса в виде

$$\alpha = \alpha_k - \xi[\alpha_k - \alpha_n - \eta(1 - \alpha_n)]. \quad (12)$$

Из (12) видно, что при больших КПД,

$$\eta \geq \frac{\alpha - \alpha_n}{1 - \alpha_n}, \quad (13)$$

тепловой баланс при $\alpha_k > \alpha$ невозможен: происходит отвод слишком большой мощности, и территория охлаждается. Справиться с этой трудностью можно, применив зачернение компенсирующих площадей, чему соответствует $\alpha_k = 0$. При этом из (12) получаем требуемое для поддержания баланса значение ξ :

$$\xi = \frac{\alpha}{\eta(1 - \alpha_n) + \alpha_n}. \quad (14)$$

Полезная мощность, передаваемая на Север, есть

$$\tilde{P}_c = qS\eta\xi(1 - \alpha_n) = qS \frac{\alpha(1 - \alpha_n)\eta}{(1 - \alpha_n)\eta + \alpha_n}. \quad (15)$$

Наибольшее ее значение достигается при $\alpha_n = 0$ и равно

$$\tilde{P}_{c \text{ макс}} = qS\alpha. \quad (16)$$

Рассмотрим случай низких КПД (т. е. противоположный (13)). Теперь для поддержания баланса требуется $\alpha_k > \alpha$, и (12)

*) Для определенности говорим о северном полушарии; словом «Север» условно обозначаем зону средних и высоких широт.

дает

$$\xi = \frac{\alpha_k - \alpha}{\alpha_k - \alpha_n - \eta(1 - \alpha_n)}. \quad (17)$$

Для полезной мощности имеем

$$\tilde{P}_c = qS \frac{(\alpha_k - \alpha)\eta(1 - \alpha_n)}{\alpha_k - \alpha_n - \eta(1 - \alpha_n)}. \quad (18)$$

Максимальное значение \tilde{P}_c достигается при максимальном значении η , совместимом с (13), и $\alpha_n = 0$. Оно совпадает с (16). Таким образом, мы пришли к выводу, что максимальный отвод мощности с территории пустынь, совместимый с сохранением теплового баланса, определяется соотношением (16) и не зависит от η (результат, очевидный заранее: нельзя отводить энергии больше, чем ее отражалось в космос).

Перейдем к случаю, когда энергия на площади S производится термоядерными энергетическими установками с мощностью $P_{т-я}$ и КПД η . Условие теплового баланса имеет вид

$$P_{т-я}(1 - \eta) = qS(\alpha_k - \alpha) \quad (19)$$

(подразумевается, что покрытия с $\alpha_k > \alpha$ нанесены на всей площади). Полезная мощность, передаваемая потребителям, есть

$$\tilde{P}_{т-я} = \eta P_{т-я} = qS \frac{(\alpha_k - \alpha)\eta}{1 - \eta}. \quad (20)$$

В отличие от «солнечного» случая, приближение η к единице ведет к неограниченному росту полезной мощности. Таким образом, и в ситуации, когда энергия используется вне пределов энергетической площадки, солнечная энергетика не имеет особых преимуществ.

Остановимся на тепловом балансе в зоне энергопотребления в средних и высоких широтах. Здесь выделение тепла тоже можно, в принципе, компенсировать посредством увеличения альбедо территорий, прилегающих к энергопотребляющим объектам. К сожалению, из-за меньшего потока солнечного излучения и большей облачности, компенсация теплового загрязнения требует увеличения альбедо очень больших площадей. Поэтому теплового загрязнения в средних и высоких широтах, по-видимому, избежать не удастся (разумеется, и в том случае, когда потребляемая на Севере энергия вырабатывается в пустынях солнечными преобразователями).

Если говорить об использовании термоядерной энергии, то — для облегчения ситуации с тепловым загрязнением на Севере — реакторы целесообразно размещать в зоне пустынь (поскольку там можно относительно легко компенсировать выделение тепловой мощности $(1-\eta)P_{т-я}$ с помощью пассивных отражателей), так что тепловое загрязнение на Севере будет связано только с полезной мощностью $\eta P_{т-я}$. Возможно, рассредоточение энергопотребляющих объектов сделает определенный уровень «загрязнения» допустимым. Дополнительно улучшить ситуацию можно путем переноса в зону пустынь и наиболее крупных потребителей энергии (что приближает ситуацию к рассмотренной в начале заметки) — выделение ими тепла можно компенсировать установкой отражателей. Относящееся к этому случаю обобщение вышеприведенных формул очевидно.

Разумеется, количественный смысл полученных результатов не следует преувеличивать: более основательный анализ проблемы должен включать в себя такие не учтенные нами факторы, как конечность поглощения света в атмосфере, различие в условиях отражения и поглощения прямого и рассеянного солнечного света, появление «нелинейных» эффектов (типа изменения усредненной по времени облачности в зоне размещения энергетических установок) и многое другое. С другой стороны, общее заключение об отсутствии крупных преимуществ у солнечной энергетики кажется достаточно надежным, так как базируется на очень «грубых» свойствах системы.

В заключение заметим, что существующие сегодня оценки того, какие отклонения от локального и глобального теплового баланса следует считать допустимыми, отличаются большой неопределенностью. Не исключено, что дальнейший анализ покажет, что при прогнозируемых на ближайшие десятилетия темпах развития энергетики никаких специальных мер по сохранению баланса в средних широтах вообще не потребуется.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В справочных целях приведем результаты расчетов среднего за сутки потока солнечной энергии q_1 в зависимости от географической широты точки наблюдения θ , пренебрегая поглощением и рассеянием света в атмосфере. Эти результаты позволяют установить верхнюю границу мощности, на потребление которой можно рассчитывать в данной точке. Положение Земли в ее суточном враще-

нии будем описывать азимутальным углом φ , отсчитываемым вдоль экватора от плоскости, проходящей через центр Солнца и ось вращения Земли ($0 \leq \varphi < 2\pi$). Изменением положения центра Земли за сутки, связанным с ее движением вокруг Солнца, пренебрегаем. Обозначая через \vec{n}_c и \vec{n} единичные векторы, направленные из центра Земли в центр Солнца и в точку наблюдения, соответственно, можно записать следующее выражение для интересующей нас величины:

$$q_1 = \frac{q_0}{2\pi} \int (\vec{n} \vec{n}_c) d\varphi,$$

где $q_0 \simeq 1,4$ кВт/м² — солнечная постоянная, а интегрирование ведется по интервалу значений φ , в котором $\vec{n} \vec{n}_c \geq 0$.

Положение Земли в ее движении вокруг Солнца будем описывать азимутальным углом χ ($\chi=0$ в день летнего солнцестояния, $\chi=\pi/2$ в день осеннего равноденствия и т. д.) Графики зависимости q_1/q_0 от широты приведены на рис. 1а, а графики зависимости q_1/q_0 от угла χ — на рис. 1б.

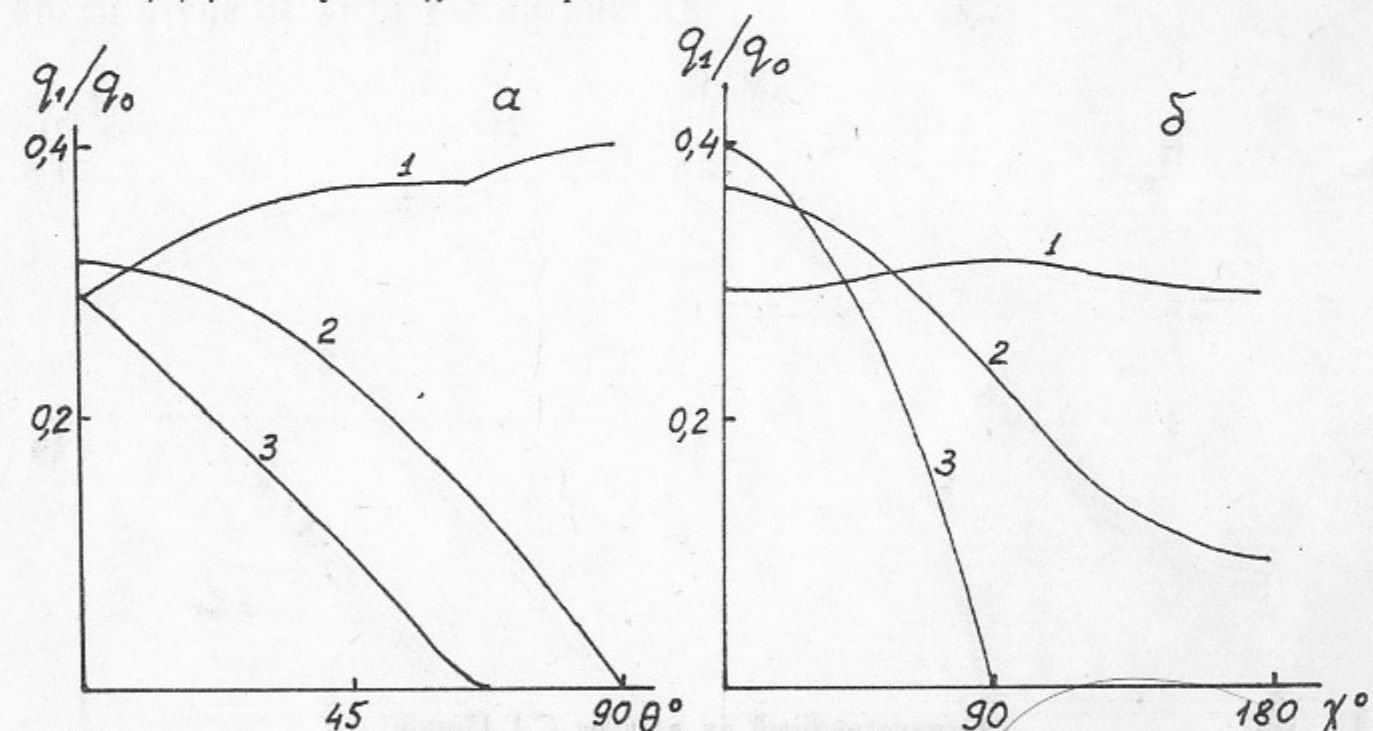


Рис. 1. Средний за сутки поток солнечной энергии: а — в зависимости от широты в день летнего солнцестояния (1), в дни весеннего и осеннего равноденствия (2), в день зимнего солнцестояния (3); б — в зависимости от положения Земли на орбите для экватора (1), широты 45° (2) и полюса (3); среднее по году значение q_1 (т. е. величина, которая в тексте обозначалась через q) равно $0,307q_0$ для экватора и $0,127q_0$ для полюса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Primary Energy (K.O. Thielheim—Ed.), Springer—Verlag, Berlin—Heidelberg—New York, 1982.

Д.Д. Рютов

**Солнечная энергетика
и «тепловое загрязнение» атмосферы**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 11 января 1989 г.

Подписано в печать 18.01. 1989 г. МН 10019

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,1 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.

Тираж 180 экз. Бесплатно. Заказ № 6

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики
СО АН СССР,*

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.