

УДК 551.46.09:621.483

Н. А. Скорохватов

Е. Г. Андреев

Г. Г. Хунджуа

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ МОРЕМ
И АТМОСФЕРОЙ

В статье приведены результаты натурных исследований суммарного теплового потока и потока эффективного излучения поверхности моря, полученных во время экспедиции 1976 г. на Черном море. С помощью новой разработанной аппаратуры получены кривые суточного хода указанных потоков и приведены сравнительные данные для районов открытого моря и прибрежной зоны. Иллюстрируется влияние нефтяной пленки на формирование тепловых потоков от моря в атмосферу.

Исследование процессов теплообмена при мелкомасштабном взаимодействии между морем и атмосферой в последнее время приобретает все большее значение. Актуальность подобных работ обусловлена тем, что процессы испарения, эффективного длинноволнового излучения и контактного теплообмена, развивающиеся на границе раздела, определяют в конечном счете климат и погоду нашей планеты. Кроме того, актуальной стала и проблема охраны морей и океанов от загрязнений, например, нефтепродуктами, существенно влияющих как на течение естественных химико-биологических процессов, так и на процессы теплообмена.

На кафедре физики моря ведутся работы по исследованию мелкомасштабных процессов взаимодействия между морем и атмосферой. Были разработаны методика и аппаратура для регистрации суммарного потока тепла от моря в атмосферу, а в последнее время методика и аппаратура для регистрации потока эффективного длинноволнового излучения с поверхности моря. Регистрации суммарного теплового потока производились методом быстрого зондирования тонкого поверхностного слоя моря малоннерционным термодатчиком [1]. Такой метод позволяет получить непрерывный профиль температуры в так называемой «холодной пленке» моря и, следовательно, определить вертикальный градиент температуры в этом слое. По данным регистраций градиента температуры в поверхностном слое моря производятся оценки суммарного потока тепла от моря в атмосферу с точностью до 15—20%. Подробное описание методики и результатов измерений суммарного потока тепла этим методом приводится в работах [1, 2, 3].

Регистрация потока эффективного длинноволнового излучения с морской поверхности производились с помощью двух идентичных инфракрасных радиометров, работающих в спектральном интервале 8—12 мкм. Описание электронных схем инфракрасных радиометров дано в работе [4]. Работу измерительных систем радиометров можно описать следующим образом.

Инфракрасное излучение объекта, подлежащего изучению, фокусируется оптической системой на чувствительную площадку пироприемника ЛПП-2. Оптическая система состоит из германиевой линзы, одно-

временно являющейся фильтром для излучения видимого диапазона, и внутреннего, защитного фильтра пироприемника. В пространстве между линзой и пироприемником вращается обтюратор. Обтюратор в схеме выполняет две функции: он служит источником опорного теплового излучения и модулирует внешний поток инфракрасной радиации. На выходе пироприемника формируется импульсный сигнал, амплитуда которого пропорциональна разности мощностей внешнего и опорного тепловых излучений, падающих на чувствительную площадку, частота сигнала равна частоте модуляции; с выхода приемника сигнал поступает на вход предварительного усилителя сигнала, после которого — на синхронный интегратор.

Синхронный интегратор является основным узкополосным элементом схемы. Его частотная характеристика эквивалентна частотной характеристике гребенчатого фильтра, настроенного на нечетные гармоники сигнала. Ширина полосы пропускания составляющих гребенки выбрана равной 2 Гц. Управление работой синхронного интегратора производится опорными импульсами, поступающими с формирователя опорных импульсов. С выхода синхронного интегратора сигнал поступает на вход дифференциального усилителя. Усилитель имеет трансформаторный выход, с которого снимаются два сигнала в противофазе, необходимые для работы синхронного детектора. Кроме этих сигналов на вход синхронного детектора поступают опорные импульсы с формирователя опорных импульсов. После преобразования к нулевой частоте синхронным детектором выходной сигнал через соединительный кабель поступает на вход регистрирующей аппаратуры (ЭПП-09).

Для стабилизации числа оборотов электродвигателя ДПМ-25-Н, обеспечивающего вращение обтюратора, в приборе применена схема импульсного питания с оптико-механической обратной связью на фотодиоде. Импульсы, вырабатываемые фотодиодом, используются также для формирования опорных импульсов, необходимых для работы синхронного интегратора и синхронного детектора. Для точной регистрации температуры обтюратора, формирующего опорное тепловое излучение, внутри пассивно термостабилизируемой оптической головки радиометра размещена схема измерения температуры обтюратора, представляющая собой неуравновешенный мост постоянного тока с включенными в противоположные плечи платиновыми термометрами сопротивления ИС-264 А.

Описанная инфракрасная аппаратура заключена в герметичный цилиндр — контейнер высотой 16 см и диаметром 20 см. При работе в натуральных условиях для предотвращения перегрева контейнера падающей коротковолновой солнечной радиацией на контейнер одевается специальный защитный кожух. Кожух выполнен из пенопласта и снаружи покрыт зеркальной пленкой, практически полностью отражающей коротковолновое излучение. Градуировка радиометров производилась по температуре тщательно перемешанной воды в термостате. Такой метод градуировки позволяет быстро изменять температуру источника в широких пределах и может быть легко осуществлен в натуральных условиях.

Во время проведения регистраций один из радиометров постоянно направлен на морскую поверхность, другой — имеет противоположную ориентацию. Поток эффективного излучения рассчитывался как разность между восходящим потоком длинноволнового излучения с поверхности моря и потоком противозлучения атмосферы: $q_{эф} = q_{\uparrow} - q_{\downarrow}$.

В измерительной системе радиометров постоянная времени $\tau = 0,3$ с, чувствительность по определению температуры — 2,45 мВ/град. Точ-

ность регистрации температуры составляет $0,05^\circ$, относительная точность регистрации потока эффективного длинноволнового излучения 5% .

В 1976 г. на НИС «Московский университет» в Черном море проводились синхронные регистрации суммарного теплового потока, потока эффективного излучения, температуры поверхности моря и средних значений температуры на дискретных уровнях в двухметровом пограничном слое.

Как известно, суммарный тепловой поток с поверхности моря имеет три составляющих: потоки тепла за счет испарения, эффективного излучения и контактного теплообмена. По данным Дитриха [5] среднегодовое соотношение для Мирового океана между потоками таково: поток тепла, существующий за счет испарения, составляет 51% от полного теплового потока, на эффективное излучение приходится 42% и контактный теплообмен — 7% . Таким образом, основной вклад в суммарный поток тепла от моря в атмосферу ($\sim 93\%$) вносят два первых потока. Следовательно, по результатам синхронных регистраций суммарного потока тепла и потока эффективного излучения можно произвести оценку тепла на испарение. Точность такой оценки в основном будет зависеть от величины потока тепла, существующего за счет контактного теплообмена.

Так как точность регистрации суммарного потока тепла от моря в атмосферу не превосходит 15% , предложенный метод проведения оценок, на наш взгляд, полностью оправдан. Таким образом, синхронные регистрации суммарного потока тепла и потока эффективного излучения позволяют разделить потоки тепла и оценить их роль в формировании суммарного потока тепла от моря в атмосферу при различных условиях. Регистрации суммарного потока тепла от моря в атмосферу и потока эффективного излучения проводились на многосточных станциях при удалении от берега не менее чем на $20\div 25$ миль. Всего было получено более 200 синхронных регистраций суммарного потока тепла, потока эффективного излучения, одновременно проводились наблюдения направления и скорости ветра, степени облачности, температуры поверхности моря радиационным методом. Для сравнения были проведены регистрации соответствующих величин в прибрежной зоне. Во время измерений судно находилось в дрейфе, измерительная аппаратура при этом располагалась на легком трехпоплавковом буйе, удаленном от судна на $50\text{—}70$ м.

Из всей совокупности экспериментального материала, накопленного во время проведения шести суточных станций в открытом море, были отобраны данные, полученные при малооблачном небе и скорости ветра до $6\text{—}8$ м/с. Отобранный материал получен на трехсуточной станции. На рис. 1 представлены осредненные кривые суточного потока тепла, направленных от моря в атмосферу.

Кривая 1 отображает изменение в суточном цикле суммарного потока тепла с поверхности моря. Среднесуточная величина этого потока по данным регистраций составляет 210 Вт/м². Минимальное значение потока было зарегистрировано в 7 ч по местному времени и оказалось равным 110 Вт/м². Максимум потока пришелся на 20 ч и равен 420 Вт/м². В вечернее, ночное и утреннее время средняя величина суммарного потока меньше, чем в дневное время. Так, с 0 до 10 ч. и с 21 до 0 ч среднее значение суммарного потока равно 175 Вт/м², а с 11 до 20 ч включительно — 265 Вт/м². Таким образом, в дневное время суммарный тепловой поток с поверхности моря в среднем повышался на 50% . Небольшое снижение потока тепла, наблюдавшееся с 13

до 16 ч, по-видимому, не является какой-либо закономерностью суточного цикла и может быть объяснено влиянием местных факторов.

Кривая 2, изображенная на этом рисунке, описывает изменение потока эффективного излучения. Форма кривой свидетельствует о незначительном изменении этого потока в суточном цикле при малооблачной погоде, амплитуда его колебаний не превышает 5%. Среднесуточное значение потока эффективного излучения с поверхности моря равно 45 Вт/м^2 . По данным регистраций суммарного теплового потока и потока эффективного излучения построен график изменения в су-

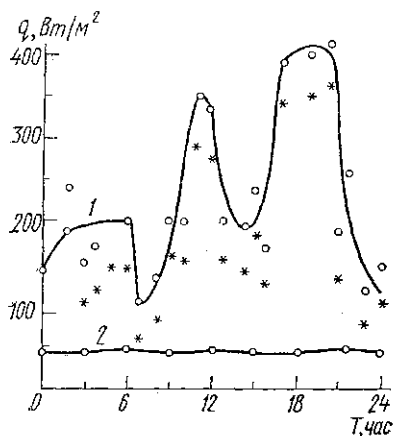


Рис. 1. Осредненные кривые суточного хода тепловых потоков по данным регистраций в открытом море 17—20 августа 1976 г. 1 — суммарный тепловой поток, 2 — поток эффективного излучения, * — поток тепла на испарение

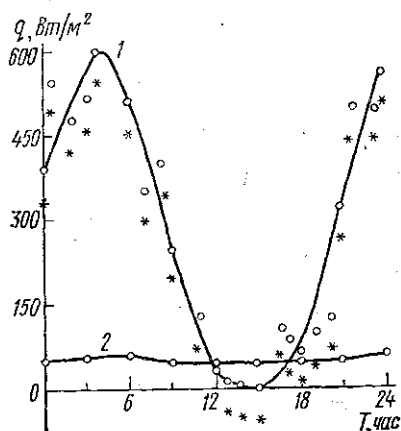


Рис. 2. Осредненные кривые суточного хода тепловых потоков по данным регистраций в прибрежной зоне 11—14 августа 1976 г. 1 — суммарный тепловой поток, 2 — поток эффективного излучения, * — поток тепла на испарение

точном цикле потока тепла, связанного с испарением с морской поверхности. Среднесуточная величина этого потока оказалась равной 150 Вт/м^2 , что составляет примерно 70% от суммарного потока тепла.

Кривая (*) суточного хода потока тепла на испарение практически полностью повторяет ход кривой 1. В прибрежной зоне суточный ход тепловых потоков имеет существенно иной характер. Соответствующие кривые представлены на рис. 2. Кривая 1 отображает изменение в суточном цикле суммарного потока тепла, направленного от моря в атмосферу. Как хорошо видно на рисунке, в прибрежной зоне в дневное время наблюдается минимум суммарного потока тепла. Средняя величина этого потока в ночное время равна 400 Вт/м^2 , а в светлое время суток 50 Вт/м^2 . Время возрастания потока в суточном цикле составляет 11 ч, в течение 13 ч поток убывает. Максимум потока наблюдался в 4 часа по местному времени, минимум в 14 ч.

Суточный ход потока эффективного излучения иллюстрирует кривая 2. Так же, как и полный тепловой поток, поток эффективного излучения имеет минимум в дневное время. Однако вызван он другими причинами. Во время проведения регистраций в прибрежной зоне в дневное время наблюдалось появление облачности, которая рассасывалась к вечеру. Как известно, наличие облачности довольно сильно снижает величину потока эффективного излучения. Максимальное зна-

чение потока было зафиксировано в 8 ч. и составило 58 Вт/м^2 , минимум наблюдался в 15 ч — 42 Вт/м^2 . Среднесуточное значение потока эффективного излучения составило 50 Вт/м^2 . Колебания потока тепла на испарение отражает кривая (*). Как показывает ход этой кривой, наибольшая интенсивность испарения наблюдается в ночное время, а в период с 8 до 20 ч интенсивность испарения резко падает. Такую особенность поведения потока тепла на испарение в прибрежной зоне можно объяснить влиянием бриза. В ночное время сухой теплый ветер с берега вызывает интенсивное испарение, в дневное же время напротив влажный холодный морской ветер препятствует испарению с поверхности моря.

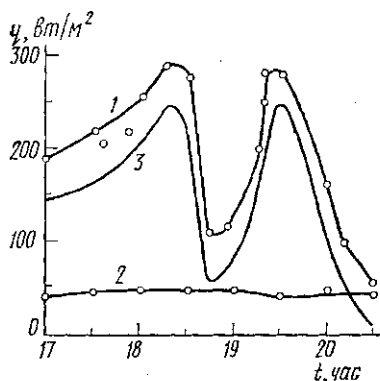


Рис. 3. Влияние поверхностно-активной пленки на формирование тепловых потоков от моря в атмосферу: 1 — суммарный тепловой поток, 2 — поток эффективного излучения, 3 — поток тепла на испарение

Так как вклад процесса испарения в теплообмен между морем и атмосферой наиболее значителен по сравнению с эффективным излучением и контактным теплообменом, то и полученный ход суммарного потока тепла в основном объясняется колебаниями интенсивности испарения с поверхности моря. Условия формирования тепловых потоков в прибрежной зоне существенно отличаются от условий открытого моря. Именно этим, по нашему мнению, можно объяснить принципиальные различия суточного хода тепловых потоков в упомянутых районах.

В условиях открытого моря на одной из суточных станций исследовалось влияние поверхностно-активной пленки

на формирование тепловых потоков от моря в атмосферу. Сразу же после того как буй с измерительной аппаратурой попал в зону первого, сравнительно небольшого участка морской поверхности, покрытого поверхностно-активными веществами (его радиус не превышал 10 м), суммарный тепловой поток от моря в атмосферу начал резко уменьшаться. Этот процесс продолжался до момента выхода буя с измерительной аппаратурой из указанного района. Кривые изменения тепловых потоков под влиянием поверхностно-активной пленки приведены на рис. 3.

После исчезновения поверхностно-активной пленки произошло практически полное восстановление величины суммарного теплового потока. Последовавшее вскоре за этим восстановление пленки на участке морской поверхности радиусом более 100 м вызвало повторный спад суммарного потока тепла от моря в атмосферу.

Обработка данных показала, что суммарный тепловой поток при появлении в первый раз поверхностно-активной пленки снизился с 300 до 120 Вт/м^2 , изменение потока составляет 60% от первоначальной величины. Вторичное появление поверхностно-активной пленки показало еще большее снижение суммарного теплового потока до 80%. Проводившиеся в это время радиационные наблюдения показали, что поток эффективного длинноволнового излучения практически не зависит от наличия или отсутствия поверхностно-активной пленки. Средняя величина потока эффективного длинноволнового излучения составляла 42 Вт/м^2 . Отклонения мгновенных значений от среднего не превышают 7%.

Синхронные регистрации суммарного теплового потока тепла от моря в атмосферу и потока эффективного длинноволнового излучения при наличии на поверхности моря поверхностно-активной пленки позволяют сделать вывод: уменьшение суммарного теплового потока в этих условиях вызвано резким снижением интенсивности испарения с поверхности моря.

Кривая 3 рис. 3 дает представление о величине относительного изменения потока тепла на испарение. Появление поверхностно-активной пленки в первый раз вызвало уменьшение этого потока примерно на 75%, во второй раз — на 90% от первоначальной величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Е. Г., Гуров В. В., Хунджуа Г. Г. В кн.: Тепломассообмен, т. 10. Киев, 1976.
2. Андреев Е. Г., Хунджуа Г. Г. «Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана», 1974, № 10.
3. Андреев Е. Г., Гуров В. В., Гусев А. М., Хунджуа Г. Г. Деп. ВИНТИ № 1847.75; РЖ-геофиз., 11-В126.
4. Скорохватов Н. А. «Тр. НИИ ГМП», 1977, № 69, 10—14.
5. Дитрих Г. (с участием К. Калле). Общая океанография. М., 1962.

Поступила в редакцию
21.4 1976 г.
Кафедра
физики моря и вод суши