ВОССТАНОВЛЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ НАД МОРЕМ ПО СУДОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ СПЕКТРОВ ОБЛУЧЕННОСТИ

Глуховец Д.И.[1,2]

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

[2]Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

e-mails: glukhovets@ocean.ru

На основе судовых гиперспектральных измерений облученности сверху поверхности моря в Баренцевом и Карском морях (95-й и 96-й рейсы НИС «Академик Мстислав Келдыш», июнь – август 2024 г.) разработана методика восстановления трех наиболее информативных метеорологических параметров (типа воздушной массы, метеорологической дальности видимости, общего содержания водяного пара) с использованием модели (Gregg and Carder, 1990) в условиях безоблачной атмосферы. Параметры модели подбираются решением обратной задачи путем минимизации различий между измеренным и модельным спектрами. Предложенный подход расширяет возможности использования судовых спектрорадиометрических данных для исследования атмосферы над океаном и может служить основой для валидации спутниковых продуктов и данных реанализа, характеризующих состояние безоблачной атмосферы.

Ключевые слова: метеорологические параметры атмосферы, облученность сверху, обратная задача, арктические моря.

Введение. Для получения количественной оценки потока коротковолновой солнечной радиации, поглощенной в фотическом слое океана, в широком пространственно-временном масштабе необходимо привлечение данных моделирования [1]. Примером широко используемой модели для безоблачной атмосферы может служить результат работы [2]. В частности, данная параметризация интегрирована в программный пакет HydroLight [3]. Для работы этой модели необходим набор из восьми метеорологических параметров: атмосферное давление P, тип воздушной массы AM, относительная влажность RH, общее содержание водяного пара WV, средняя за 24 часа скорость ветра WM, мгновенная скорость ветра W, метеорологическая дальность видимости V и общее содержание озона O_3. На практике использование такого числа параметров затруднено из-за отсутствия регулярных измерений в открытом океане, высокой пространственно-временной изменчивости их значений и сложности оперативного получения полного набора данных. Цель настоящей работы – выделить наиболее информативные параметры модели [2] и разработать методику их восстановления путем решения обратной задачи относительно результатов судовых измерений облученности сверху на поверхности моря.

Материалы и методы. Измерения выполнены в 95-м и 96-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Баренцевом и Карском морях в период с июня по август 2024 г. Спектры

облученности сверху $E_d(\lambda)$ регистрировались раз в минуту гиперспектральным палубным радиометром RAMSES (TriOS, Германия) в диапазоне 320–950 нм с погрешностью 5-10% в зависимости от длины волны. Прибор устанавливается на стабилизаторе вертикали для исключения влияния качки в незатеняемом месте на палубе. Из общего массива данных для дальнейшего анализа отобрано 36 спектров, измеренных в безоблачных условиях; для каждого из них выполнено 20-минутное осреднение. По спектральным данным рассчитаны значения фотосинтетически активной радиации (ФАР) в диапазоне 400–700 нм.

В качестве модели переноса излучения в атмосфере использован алгоритм [2], который для заданных метеорологических условий вычисляет спектральную облученность на уровне моря $E_d(\lambda)$ разрешением 1 нм. Модель разделяет прямую и диффузную составляющие, учитывает рэлеевское и аэрозольное рассеяние, а также поглощение газами и аэрозолями. Детальное описание использованных эмпирических параметризаций приведено в [2]. Значения спектральной солнечной постоянной, а также коэффициентов поглощения озона, кислорода и водяного пара в диапазоне 300–1000 нм заимствованы из файлов программного пакета HydroLight [3], где данная модель реализована под названием «RADTRAN-X». Для корректного сопоставления результатов моделирования с данными судовых измерений результаты расчета сглаживались скользящим фильтром с окном 12 нм.

Для каждого судового измерения методом нелинейной оптимизации (функция fmincon в среде MATLAB) подбирались значения $AM \in [1, 10]$, $V \in [3, 35]$ км и $WV \in [1, 7]$ см, минимизирующие среднеквадратичное отклонение между измеренным и модельным спектрами в диапазоне 320–750 нм. Остальные параметры фиксировались: P = 1013,25 мбар (стандартное атмосферное давление), RH = 80% (типичное значение для морской атмосферы), WM и W принимались равными 5 м/с (значение, характерное для штилевых условий, в которых проводилось большинство измерений), O_3 = 300 DU (соответствует средней климатологии исследуемого региона, используемой в HydroLight: данные спутникового спектрометра TOMS, осредненные за 2000–2004 гг.). Выбор фиксированных значений обоснован результатами предварительного анализа чувствительности: вариации этих параметров в реалистичном диапазоне изменяют рассчитанную облученность на величину, не превышающую погрешности измерений.

Результаты. Пример восстановления параметров и рассчитанный по ним спектр облученности для точки с координатами 76,185 ° с.ш., 57,325° в.д. (28 июля 2024 г., 10:00 UTC) представлен на рисунке 1. Измеренный спектр (синяя линия) и спектр, рассчитанный по восстановленным параметрам (AM = 1,5; V = 11,9 км; WV = 2,1 см), отлично согласуются: в диапазоне ФАР среднеквадратичная ошибка составляет 0,018 Вт $м^{-2}$ $нм^{-1}$, относительная

погрешность – 2,3%. Модель хорошо воспроизводит детали спектра: полосы поглощения водяного пара (590 нм) и кислорода (690 нм и 760 нм), а также общий наклон спектра, определяемый рэлеевским и аэрозольным рассеянием.

Пространственное распределение рассчитанных значений метеорологической дальности видимости *V* для выбранных безоблачных дней (25 июня – 23 августа 2024 г.) представлено на рисунке 2. Максимальные значения видимости (*V* > 25 км) зарегистрированы преимущественно в северной части маршрута, что объясняется уменьшением аэрозольной оптической толщины по мере удаления от континентальных и антропогенных источников аэрозоля. Исключение составляют две точки к юго-западу от Земли Франца Иосифа.

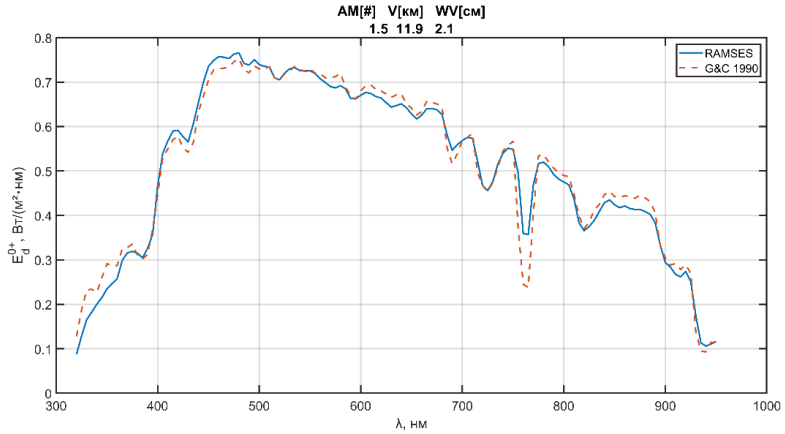

Рисунок 1 – Спектры облученности сверху на поверхности моря: измеренный в Баренцевом море 28 июля 2024 г. (синяя линия) и рассчитанный по модели [2] с восстановленными параметрами (красный пунктир)

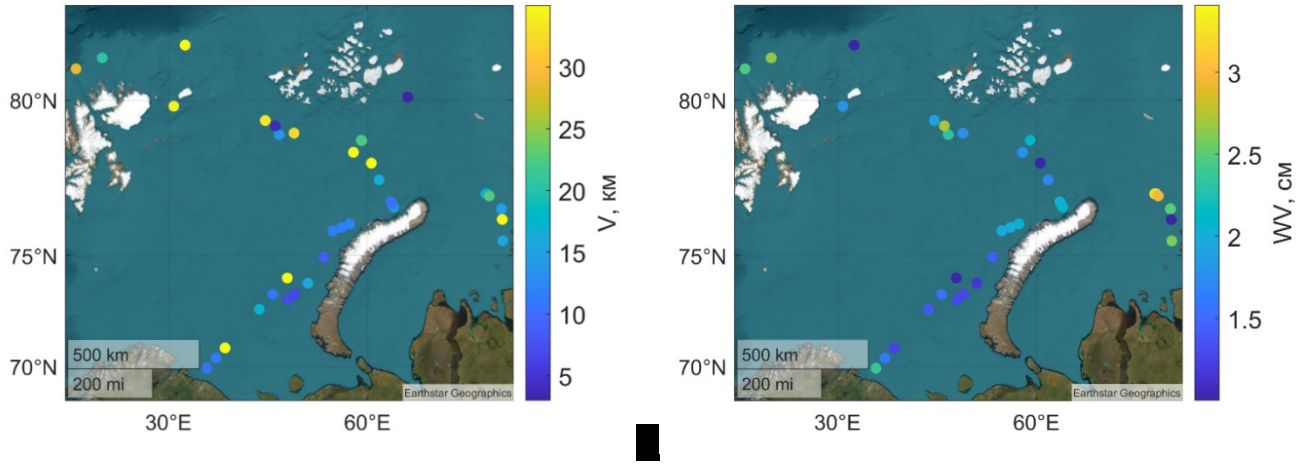

Рисунок 2 – Пространственные распределения метеорологической дальности видимости (слева) и общее содержание водяного пара (справа) для выбранных безоблачных дней в Баренцевом и Карском морях 25 июня – 23 августа 2024 г., восстановленные по судовым измерениям облученности сверху

Сравнение измеренных и рассчитанных по восстановленным параметрам значений ФАР для всех 36 спектров приведено на рисунке 3. Получено высокое соответствие: коэффициент детерминации R^2 = 0,99; среднеквадратичная ошибка 38,7 мкЭ/м²·с; относительная – 5,5%.

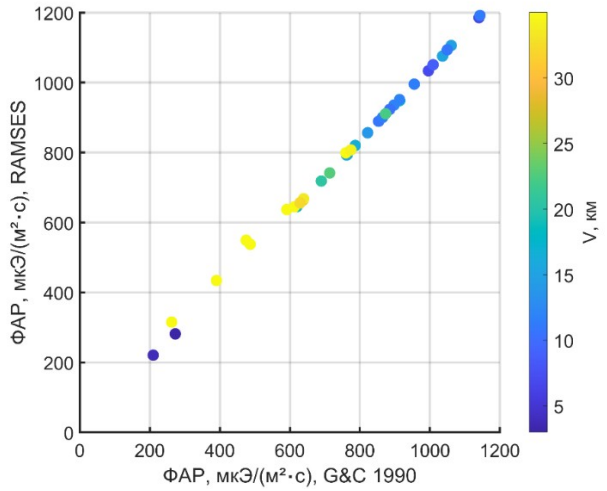

Рисунок 3 – Сопоставление измеренных и рассчитанных по восстановленным параметрам атмосферы значений ФАР по модели [2] в безоблачных условиях. Цветом показаны значения метеорологической дальности видимости

Заключение. Разработана и апробирована методика восстановления типа воздушной массы, метеорологической дальности видимости и общего содержания водяного пара по данным судовых измерений спектров облученности сверху на поверхности моря в безоблачных условиях. Методика основана на подборе трех наиболее информативных параметров широко используемой модели [2]. Показано, что восстановленные параметры позволяют моделировать спектральную облученность и значения ФАР с погрешностью около 5%. Предложенный подход расширяет возможности использования судовых спектрорадиометрических данных для исследования атмосферы над океаном и может служить основой для валидации спутниковых продуктов и данных реанализа, характеризующих состояние безоблачной атмосферы.

Работа при поддержке гранта РНФ № 25-77-10065. Грант предоставлен через Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Автор благодарит Д.Н. Дерягина за данные судовых определений спектров облученности сверху.

1. *Глуховец Д.И.* Расчет обусловленного солнечной радиацией удельного потока тепла в водах Геленджикского района Черного моря // Океанология. 2025. Т. 65. № 6. С. 907-915.

2. *Gregg W.W., Carder K.L.* A simple spectral solar irradiance model for cloudless maritime atmospheres // Limnology and Oceanography. 1990. V. 35. № 8. P. 1657–1675.

3. *Hedley J.D.* HYDROLIGHT MC. 6.0 ECOLIGHT 6.0 Technical Documentation / Numerical Optics Ltd.: Tiverton, UK. 2019.