

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИРОДНЫХ ВОД ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В. Б. Киселев¹, Т. Хееге², С. Микса²

¹Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д.39
<kisselev@spiiras.nw.ru>

²Германский аэрокосмический центр,
Институт методологии дистанционного зондирования,
D-82234 Wessling, Deutschland
<thomas.heege@dlr.de>

УДК 550.30-5:535.36

В. Б. Киселев, Т. Хееге, С. Микса. Компьютерная технология восстановления качества природных вод по данным дистанционных наблюдений // Труды СПИИРАН, Вып. 2, т. 2. — СПб.: Наука, 2005.

Аннотация. Рассмотрена технологическая схема обработки результатов зондирования поверхностных вод в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра при естественном освещении. Технология основана на численном решении уравнения переноса излучения в атмосфере и водной среде и включает формирование специализированных баз данных, ускоряющих процесс восстановления состояния водной массы. — Библиограф. 12 назв.

UDC 550.30-5:535.36

V. B. Kisselev, T. Heege, S. Miksa. **Computer technology for the retrieval of natural water quality from remote observations** // SPIIRAS Proceedings. Issue 2, vol. 2. — SPb.: Nauka, 2005.

Abstract. Technological scheme of surface water remote sensing in visible and near infrared spectral regions under natural illumination is considered. The technology is based on the numerical solution of radiative transfer equation in the atmosphere and water media and includes the formation of special data bases for the acceleration of water state retrieval procedure. — Bibl. 12 items.

В системе управления геофизической природной средой одним из наиболее ресурсоемких и поэтому требующих наиболее детальной проработки компонентов является измерительная подсистема или, другими словами, система мониторинга (постоянного наблюдения состояния) окружающей среды [1]. Специфика объекта управления (система с пространственно распределенными параметрами) делает очевидной целесообразность широкого применения дистанционных методов наблюдения, позволяющих за сравнительно короткое время получить сведения о состоянии среды в значительных пространственных областях. Вместе с тем, при дистанционных наблюдениях показания измерительного прибора связаны со значениями искомой величины, как правило, весьма сложным образом, и поэтому успешное использование дистанционных методов в значительной степени зависит от наличия эффективной и надежной технологии обработки результатов измерений, т.е. в применении к геофизическим наблюдениям технологии восстановления состояния среды по показаниям прибора. Технология такого типа, рассматриваемая в данной статье, ориентирована на оптимизацию обработки результатов измерений отраженной солнечной радиации в видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах для получения информации о состоянии природных водоемов.

Большинство до недавнего времени используемых методов обработки данных об отраженной радиации для определения компонентного состава при-

родных вод носило полуэмпирический характер [2,3]. В них использовались различного рода регрессионные соотношения между отражательной способностью водоемов в ряде спектральных диапазонов и концентрацией оптически активных веществ в воде. Этот подход давал неплохие результаты в случаях, когда условия наблюдения и состояние водоема не слишком значительно отличались от тех, при которых указанные соотношения были получены. При сильной же изменчивости концентраций водных компонентов, что характерно для прибрежных морских вод и внутренних водоемов, точность предлагавшихся методов резко падала. При использовании измерений радиации с самолетных и спутниковых платформ, а именно такие измерения обеспечивают желаемый широкий пространственный охват, трудности усугублялись необходимостью учета рассеяния радиации в слое атмосферы между водоемом и измерительным прибором. Вводимые для этого в достаточной степени произвольные допущения еще более снижали точность определения искомых параметров.

Очевидной научной основой для создания более совершенной методологии восстановления состава вод по радиационным измерениям является непосредственное использование уравнения переноса излучения (см. напр. [4]). Однако, построение на этой основе соответствующих технологических схем ранее сдерживалось значительной вычислительной сложностью методов решения этого уравнения для реальных или, по крайней мере, близких к реальным пространственным распределениям оптических параметров среды. Следует добавить, что восстановление по дистанционным измерениям состава среды вообще и водной среды в частности требует решения не прямой, а обратной задачи для уравнения переноса, т.е. определения коэффициентов уравнения при условии, что известно решение уравнения в некоторой области значений независимых переменных. Обратная задача существенно сложнее прямой. Известные аналитические формулы позволяют решить ее лишь в некоторых идеализированных случаях или при значительных упрощениях. Наиболее универсальным, пригодным для создания реальной технологии, является метод итераций, который включает многократное решение прямой задачи, что представлялось трудновыполнимым. Повышение в последнее время производительности вычислительных систем и разработка эффективных численных схем решения уравнения переноса [5–7] дают такую возможность.

Основные этапы предлагаемой технологической схемы восстановления состояния поверхностных вод представлены на рис. 1. Ее информационное обеспечение включает модульную программу решения обратной задачи для уравнения переноса излучения и совокупность баз данных, содержащих как исходную информацию, так и вычисляемые в процессе работы промежуточные величины. Основной целью при определении структуры информационного обеспечения было стремление выбрать его элементы таким образом, чтобы они зависели один от другого лишь в минимально возможной степени. Такой подход дает возможность в дальнейшем по мере появления более точной исходной информации и более совершенных методов ее обработки заменять отдельные части системы, не внося при этом существенных модификаций в ее структуру в целом.

Программа решения обратной задачи использует, как уже указывалось, метод итераций, требующий, вообще говоря, многократных решений прямой задачи переноса излучения.

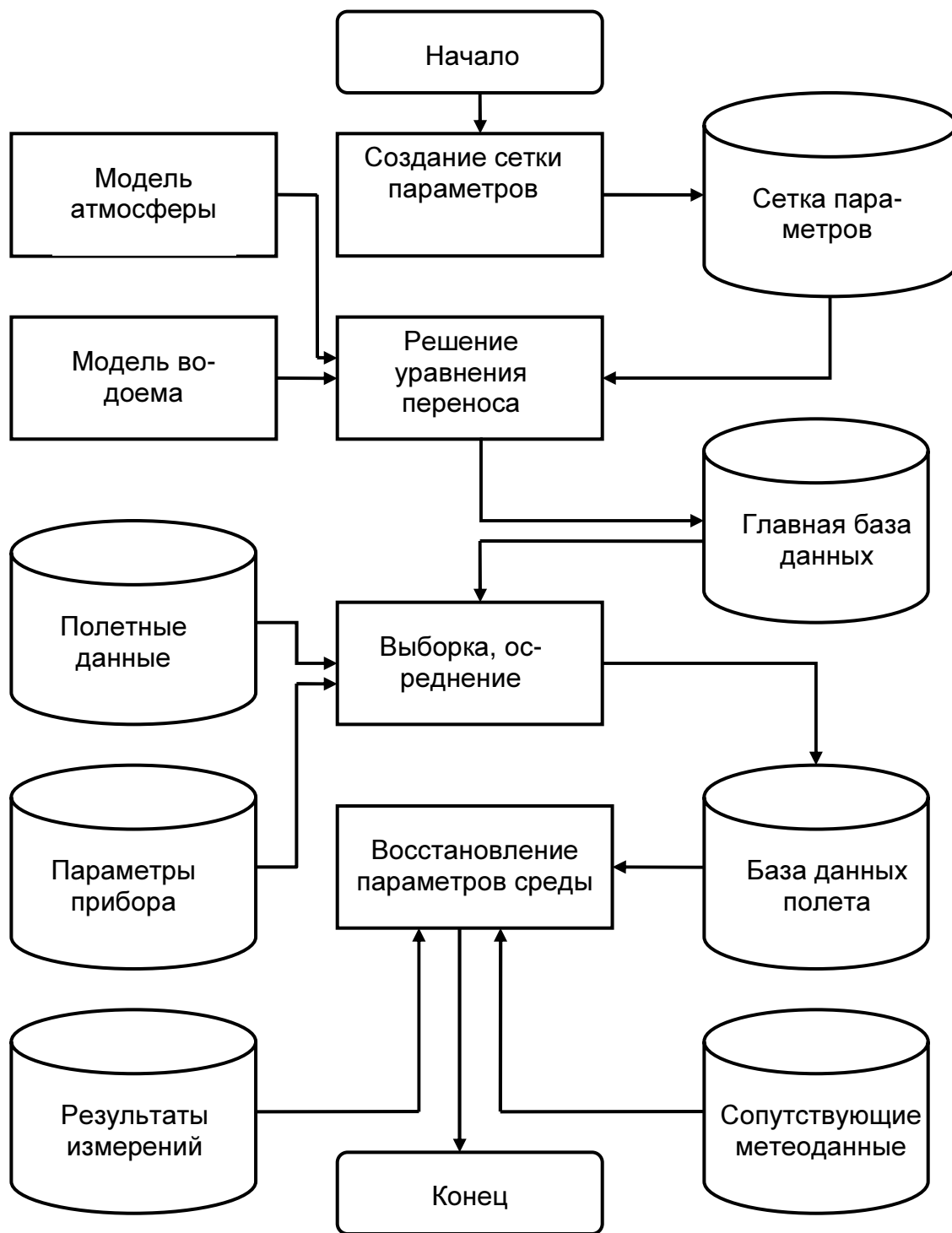


Рис. 1. Технологическая схема восстановления параметров водоема.

Несмотря на значительные успехи в этой области вычислительная сложность здесь остается весьма высокой, и прямолинейный подход привел бы к значительным затратам времени на обработку результатов каждого эксперимента. Возможно сократить суммарные временные затраты, учитывая тот факт, что данная технология предназначена для обработки большого количества экспериментов, и совокупности параметров среды, для которых необходимо вы-

полнять решение прямой задачи в процессе итераций, будут неизбежно повторяться от эксперимента к эксперименту. Соответственно, целесообразно организовать хранение полученных решений уравнения переноса излучения и вместо повторного решения уравнения пользоваться уже имеющимся результатом. Накопление решений в принятой технологической схеме осуществляется в главной базе данных.

С целью сокращения количества хранимой информации и принимая во внимание то, что уравнение переноса излучения линейно, в главной базе данных накапливаются нормированные на солнечный поток решения. Таким образом удастся сделать информацию в главной базе данных не зависящей от характеристик измерительного прибора и придать ей тем самым большую универсальность. Структура информации в этой базе данных является по существу многомерной таблицей данных об отраженном излучении. Короткем признаков, характеризующим каждое хранимое значение, будет совокупность параметров среды (т.е. атмосферы и водной массы), геометрических характеристик измерения (положение и ориентация прибора, положение солнца) и длины волны излучения. Способ параметризации состава среды (как атмосферной так и водной) в данной технологии не фиксируется и может изменяться в процессе развития научных исследований в соответствующем направлении. Соответственно, будут модифицироваться и программные модули, обозначенные на схеме как «Модель атмосферы» и «Модель водоема» и генерирующие необходимые для решения уравнения переноса излучения оптические характеристики соответствующих сред в зависимости от значений параметров. Значения параметров среды, для которых проводится расчет и результаты заносятся в главную базу данных, образуют сетку параметров, зависящую от принятых моделей сред и требуемой точности решения обратной задачи. Предполагается, что значения непрерывно изменяющихся параметров будут выбраны так, чтобы данные об отраженной радиации при промежуточных значениях параметров могли быть получены интерполяцией их значений на сетке. Процесс создания сетки параметров не всегда может быть строго формализован, и поэтому предназначенный для этой цели программный модуль целесообразно сделать диалоговым.

Исходя из информации главной базы данных строится совокупность полетных баз данных. Полетная база данных содержит результаты моделирования измерений поля отраженной радиации конкретным датчиком для условий конкретного полета при различных значениях параметров среды. Преобразование информации при переходе от главной к базе данных полета заключается в выборке данных, соответствующих времени и местности, над которой проводился полет, и высоте полета, домножению нормированных значений радиации на солнечный поток при этих условиях и последующему их осреднению с весом равным спектральной чувствительности каналов использованного измерительного прибора. Такие базы данных создаются для каждого конкретного полета и служат основой для завершающего этапа - решения обратной задачи, т.е. восстановления параметров среды. Алгоритмы используемые в модуле построения базы данных полета сравнительно просты и стабильны, так что в процессе развития технологии модуль не будет подвергаться существенным изменениям. Восстановление параметров среды сводится по существу к выбору из базы данных полета набора поля отраженной радиации в наибольшей степени приближенного к результатам измерений. Несмотря на кажущуюся простоту эта задача на самом деле не столь тривиальна. Например, при рассмотрении бли-

зости между полями возможно использование различных метрик, и от определения понятия близости будет зависеть точность восстановления. Главная сложность, однако, заключается в том, что достаточно точное параметрическое представление всего трехмерного многообразия природной среды потребовало бы столь большого количества параметров, что построение рассмотренных выше баз данных сделалось бы невозможным вследствие как их чрезвычайно большого объема, так и необходимости использования огромного вычислительного ресурса. В практической реализации возможно параметрическое представление некоторой (хотя и весьма большой) совокупности близких к реальным, но идеализированных состояний среды. Решение вопроса о том, какие идеализированные состояния необходимы для восстановления и как их использовать при обработке данных конкретных измерений и составляет существо алгоритма модуля восстановления параметров среды. Рассматриваемая технология дает возможность для проведения исследовательских работ по созданию оптимального алгоритма данного модуля при незначительных затратах сил на адаптацию остальных элементов схемы к возникающим при этом дополнительным требованиям.

Предлагаемый подход к восстановлению состояния вод ориентирован, вообще говоря, на решение задачи на основе дистанционных наблюдений с одной (самолетной или спутниковой) платформы. Вместе с тем, поскольку при восстановлении состава вод невозможно обойтись без восстановления и некоторых параметров атмосферы, было бы нерационально полностью игнорировать существование иных источников информации о ней, в частности, регулярных метеорологических наблюдений. Наблюдения эти являются, как правило, точечными, но при малой пространственной изменчивости измеряемого параметра возможно их использование совместно с дистанционными наблюдениями для повышения надежности алгоритма восстановления. По этой причине в схеме предусматривается использование информации поступающей с метеорологических станций при их наличии в исследуемом регионе.

На первой стадии разработки рассмотренной технологии программные модули реализуются на основе наиболее надежных из существующих алгоритмов, которые и составят основу технологического процесса. В модуле генерации оптических характеристик атмосферы используется модель известной программы MODTRAN [8]. Эта модель обеспечивает получение оптических характеристик со спектральным разрешением 1 см^{-1} , что достаточно для большинства датчиков, используемых для зондирования водных объектов. Модель включает совокупность стандартных вертикальных распределений микрофизических характеристик атмосферы и допускает их варьирование для адаптации к конкретным условиям наблюдения. Молекулярный состав атмосферы задается в зависимости от широты местности и времени года. В состав атмосферного аэрозоля, наиболее существенного компонента для измерений в оптическом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах, включены частицы различного происхождения, объединенные в типовые смеси. Стратосферный аэрозоль представлен восьмью типами, для аэрозоля нижних слоев атмосферы существуют известные четыре типа: сельский, морской, городской и тропосферный аэрозоль. Для повышения гибкости атмосферной модели в модуле генерации оптических характеристик атмосферы предусмотрено использование не только чистых типов аэрозоля нижних слоев, но и их произвольных комбинаций.

Модель водной среды включает такие традиционно используемые оптически активные компоненты как хлорофилл, органическая и минеральная взвесь и

растворенное органическое вещество. Оптические характеристики этих первичных компонентов значительно варьируются в различных водоемах, и поэтому в качестве параметров модели присутствуют типы этих компонентов. Каждый тип характеризуется своим спектральным ходом характеристик рассеяния и поглощения, и удельные (на единицу концентрации) их значения, полученные на основе экспериментальных исследований природных вод, хранятся в специально создаваемых файлах. Количество используемых типов ограничивается только объемом дисковой памяти, что, безусловно, не является существенным.

Решение уравнения переноса излучения выполняется методом конечных элементов [5-7]. Этот метод обеспечивает достаточно высокую точность при сравнительно небольших затратах времени центрального процессора в случае сильно вытянутых индикатрис рассеяния, характерных как для атмосферы, так и для водной среды. В принятой технологии решение выполняется для всех значений варьируемых параметров, которые были определены пользователем при создании сетки параметров, и заносится в главную базу данных. Спектральное разрешение может варьироваться пользователем. При этом допускается разбиение всего спектрального интервала на несколько диапазонов, в каждом из которых может быть выбрано свое разрешение. Состав главной базы данных не обязательно должен полностью формироваться перед началом работы. Он может наращиваться постепенно по мере возрастания разнообразия возникающих природных ситуаций при увеличении числа регионов, в которых проводятся наблюдения.

В модуле восстановления параметров среды используется двухэтапная декомпозиция задачи. На первом этапе восстанавливается состояние атмосферы в предположении, что отражение радиации водной массой близко к ортотропному. Следует подчеркнуть, что указанное предположение не относится к отражению поверхностью раздела воды и атмосферы, порождаемого различием коэффициента преломления двух сред и вычисляемого по известным формулам Френеля. Для восстановления состояния атмосферы из всей картины отраженной радиации отбираются путем визуального анализа те данные, которые относятся к оптически однородному участку водной поверхности. Это дает возможность полагать коэффициент отражения водной массы постоянным, сокращая тем самым количество восстанавливаемых параметров и повышая устойчивость задачи. На втором этапе восстановленные значения коэффициента отражения водной массы используются для определения концентраций водных компонентов. При необходимости имеется возможность организации дополнительного итерационного процесса, использующего для уточнения состава атмосферы результаты восстановления состава воды на предыдущей итерации. Этот метод был успешно опробован для восстановления состава воды в озерах Бодензее и Констанц (Германия) по данным самолетных съемок с помощью сканера DAEDALUS [9–11]. Дальнейшее развитие алгоритма восстановления состояния вод предполагает учет влияния отражения радиации дном водоема, что позволит использовать его для мелководных участков.

Исходная информация, т.е. результаты измерений отраженной радиации, хранится в форматах системы XDibias, разработанной в Германском аэрокосмическом центре и предназначенной для обработки мультиспектральных сканерных изображений земной поверхности [12]. Эта система включает большое количество модулей, позволяющих проводить уже установившиеся в качестве стандартных преобразования результатов дистанционных измерений, что дает возможность представить исходные данные для восстановления характеристик

водоема в требуемом для применения вышеописанных алгоритмов виде. В частности, поскольку XDibias содержит сведения о географической привязке и времени проведения эксперимента, а также калибровке датчиков, соответствующие модули обеспечивают перевод показаний приборов в абсолютные единицы интенсивности излучения и расчет геометрических параметров, используемых для выборки нужной информации из главной базы данных. Кроме того, XDibias содержит развитый пользовательский интерфейс для работы с многомерными изображениями, и поэтому результаты восстановления состояния водоема могут быть представлены с ее помощью в наглядной форме без значительных трудозатрат на программирование.

Предложенная структуризация технологической схемы восстановления качества природных вод, позволяющая разбить процесс восстановления на совокупность отдельных этапов, выполняемых с использованием относительно независимых программных модулей, существенно облегчает процесс ее реализации и, что не менее важно, последующего развития. Этот подход обеспечивает одновременно устойчивость технологии в целом и возможность ее быстрой модернизации на основе последних научных достижений. Оба указанных фактора повышают привлекательность технологии для конечного пользователя и, соответственно, способствуют ее широкому применению.

Литература

- [1] Гаскаров Д. В., Киселев В. Б., Солдатенко С. А., Строгонов В. И., Юсупов Р. М. Введение в геофизическую кибернетику и экологический мониторинг. Санкт-Петербург: СПГУВК, 1998. — 165 с.
- [2] Austin R. W., Petzold T. J. The determination of the diffuse attenuation coefficient of sea water using the coastal zone color scanner, *Oceanography from space*, New York: Plenum Press, 1981, pp. 239–256.
- [3] Gordon H. R., Brown O. B., Evans R. H., Brown J. W., Smith R. C., Baker K. S., Clark D. K. A semianalytic radiance model of ocean color. *J. Geophysical Research*, 1988, **93**, pp. 10909–10924
- [4] Соболев В. В. Рассеяние света в атмосферах планет, М.: Наука, 1972. — 335 с.
- [5] Kisselev V.B., Roberti L., Perona G. An application of the finite element method to the solution of the radiative transfer equation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1994, **51**, pp. 603-614.
- [6] Kisselev V.B., Roberti L., Perona G. Finite-element algorithm for radiative transfer in a vertically inhomogeneous medium: numerical scheme and application. *Applied Optics*, 1995, **34**, pp. 8460-8471.
- [7] Bulgarelli B., Kisselev V.B., Roberti L. Radiative transfer in the atmosphere-ocean system: the finite element method. *Applied Optics*, 1999, **38**, pp. 1530–1542.
- [8] Abreu L. W., Anderson G. P. The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model, Ontar Corporation, 1996. — 260 p.
- [9] Heege, T. Flugzeuggestützte Fernerkundung von Wasserinhaltsstoffen am Bodensee. Research Report. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln: 2000, Vol. 2000, No. 40. — 134 p.
- [10] Heege, T., Haese, C., Bogner, A., Pinnel, N. Airborne multi-spectral sensing in shallow and deep waters. *Backscatter*, 2003, **14**, No.1, pp. 17–19.
- [11] Heege, T., Fischer, J. Mapping of water constituents in Lake Constance using multispectral airborne scanner data and a physically based processing scheme. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, **30**, No. 1 (in press).
- [12] Mueller R., Reinartz P., Kritikos G. and Schroeder M. Image processing in a network environment. In *Proceedings of ISPRS 92, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1993, **29**, Pt B2, Commission II, pp. 289-293.