

УДК 504.75.05

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



С.А. Лысенко

*Заместитель директора ГНУ
«Институт природопользования НАН
Беларуси», д-р физ.-мат. наук, доцент.*

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь
E-mail: lysenkorfe@gmail.com*

С.А. Лысенко

Доктор физико-математических наук, доцент, заведующий центром климатических исследований – заместитель директора по научной работе Государственного научного учреждения «Институт природопользования НАН Беларуси», ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Беларусь.

Аннотация. В докладе представлены последние разработки автора в области методов экологического мониторинга атмосферы и водных объектов на основе оптического дистанционного зондирования. Рассмотрены задачи определения аэрозольной оптической толщины, массовых концентраций респираторных фракций аэрозоля, концентраций растворенных и взвешенных частиц в водоемах.

Ключевые слова: дистанционное оптическое зондирование, экологический мониторинг.

Загрязнение воздуха взвешенными частицами (аэрозолем) является одним из неблагоприятных факторов окружающей среды, влияющих на качество жизни и здоровье людей. Серьезную опасность представляют мелкодисперсные твердые частицы (PM, Particulate Matter), способные проникать в легкие человека. В связи с этим, при оценке состояния атмосферного воздуха учитываются такие показатели, как PM_{1,0}, PM_{2,5} и PM₁₀, характеризующие массы частиц диаметрами до 1,0; 2,5 и 10 мкм соответственно в единичном объеме воздуха.

Необходимость регулярного слежения за содержаниями мелкодисперсных частиц в различных слоях атмосферы возникает и при климатических исследованиях, поскольку они способны эффективно рассеивать солнечное излучение в обратном направлении, оказывая антипарниковый эффект. С другой стороны, аэрозоль влияет на процессы образования облаков и их свойства, которые, напротив, задерживают тепловое излучение Земли. Результирующий радиационный форсинг аэрозоля определяется его оптическими (показатель ослабления, показатель рассеяния, индикатриса рассеяния) и микрофизическими (концентрацией, распределением по размерам и комплексным показателем преломления частиц) характеристиками.

Для наблюдений за качеством атмосферного воздуха и источников хозяйственно-питьевого водоснабжения хорошо подходят аэрокосмические методы. К их основным достоинствам относятся: оперативность и экономичность мониторинга, высокое пространственное разрешение данных, обхват больших территорий, частая повторяемость наблюдений, возможность проведения долговременных наблюдений с целью изучения регионального и трансграничного переноса аэрозольных загрязнений.

При значительных достижениях в области оптического дистанционного зондирования в ее развитии применительно к экологическому мониторингу имеется ряд нерешенных проблем. В частности, для успешного определения концентраций атмосферного аэрозоля, растворенных и взвешенных частиц водоемов необходимы быстрые методы вычисления характеристик переноса излучения в рассеивающей среде, погрешность которых не должна превышать единиц процентов. Кроме того, для пересчета оптических характеристик аэрозолей и гидрозолей в искомые концентрации необходимы надежные оптико-микрофизические модели, учитывающие их региональные особенности и легко адаптируемые к изменениям физических параметров атмосферы (температуры, давления, влажности).

В докладе представлены последние разработки авторов в области методов экологического мониторинга атмосферы и водных объектов на основе оптического дистанционного зондирования. Рассмотрены задачи определения аэрозольной оптической толщины, массовых концентраций респираторных фракций аэрозоля, концентраций растворенных и взвешенных частиц в водоемах.

Определение оптических и микрофизических параметров атмосферного аэрозоля

Авторами разработан алгоритм восстановления высотного профиля объемной концентрации мелкодисперсной фракции аэрозоля в атмосфере по данным многочастотного лидара, не требующий привлечения вспомогательной измерительной информации [1]. Алгоритм позволяет существенно упростить процедуру сбора данных и автоматизировать процесс измерений в действующих лидарных сетях.

Алгоритм программно реализован и апробирован на данных лидара Института физики НАН Беларуси [2]. Профили микрофизических параметров аэрозоля, восстановленные из лидарных сигналов в условиях информационной неопределенности и с привлечением наземных радиометрических данных, сопоставлены на рисунке 1. Восстановленные профили объемной концентрации мелкодисперсных частиц хорошо согласуются с результатами комплексного лидарного и радиометрического зондирования атмосферы.

Область применения разработанного алгоритма включает мониторинг загрязненности воздуха взвешенными частицами, исследование регионального и трансграничного переноса аэрозольных загрязнений атмосферы, получение данных для построения и уточнения климатических моделей.

Одним из новейших приборов для зондирования атмосферы из космоса является радиометр OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) на спутниковой платформе Sentinel-3. OLCI получает изображение Земли в 21 спектральном канале из диапазона 400–1020 нм с пространственным разрешением 300 м.

В докладе представлены алгоритмы восстановления интегральных содержаний водяного пара (ВП) (IWV , $кг/м^2$) и мелкодисперсной фракции аэрозоля ($PM_{2.5}$, $мг/м^2$) в столбе атмосферы из спектральных коэффициентов яркости на ее верхней границе (R_{TOA}) [3, 4]. Для зондирования аэрозоля используются спектральные каналы 1–10 прибора OLCI ($\lambda = 400–681$ нм) в которых альbedo большинства природных поверхностей не превышает 10 %. Содержание ВП в атмосфере определяется с использованием каналов OLCI из полос поглощения ВП и кислорода, а также из окон прозрачности атмосферы, что в совокупности

позволяет исключить влияние спектра отражения подстилающей поверхности и давления воздуха на точность зондирования ВП. Наличие у OLCI каналов в спектральных областях среднего и сильного поглощений ВП обеспечивает примерно одинаковую погрешность алгоритма, как для сухого, так и для очень влажного воздуха.

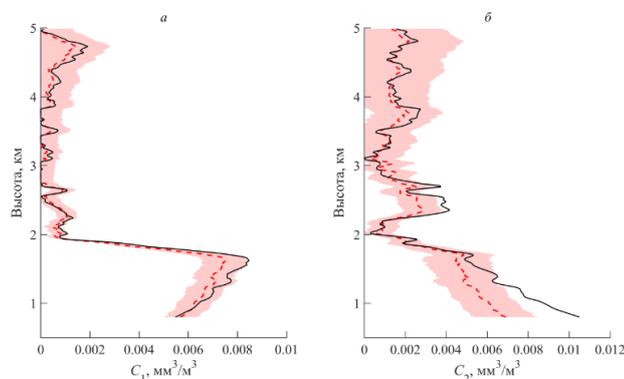


Рисунок 1. – Профили объемных концентраций мелкодисперсной (а) и грубодисперсной (б) компонент атмосферного аэрозоля, восстановленные по данным лидара Института физики НАН Беларуси без использования дополнительной измерительной информации (пунктир) в сопоставлении с результатами комплексного лидарно-радиометрического зондирования атмосферы (сплошные линии). Закрашенные области соответствуют теоретическим оценкам апостериорной неопределенности восстановленных профилей

Для быстрой обработки коэффициентов R_{TOA} , регистрируемых в формате многоспектрального изображения, используются регрессионные уравнения, связывающие R_{TOA} , IWV , $PM_{2.5}$ и геометрические параметры спутниковой сцены (высота местности, зенитные и азимутальные углы визирования и Солнца). Параметры уравнений получены на основе численного моделирования процесса переноса излучения в системе «атмосфера–подстилающая поверхность» с привлечение многолетних данных AERONET по оптическим и микрофизическим параметрам аэрозоля, а также базы данных ASTER по спектральным альbedo природных поверхностей.

Верификация разработанных алгоритмов проведена на данных прототипа OLCI – спектрометра MERIS. Оценки IWV и $PM_{2.5}$, полученные по снимкам MERIS за 2002–2012 гг. сопоставлены с результатами наземного зондирования атмосферы на семи Восточноевропейских станциях сети AERONET. Среднеквадратические отклонения сравниваемых данных – 1.24 кг/м^2 для IWV и 5 мг/м^2 для $PM_{2.5}$.

На основе разновременных многоспектральных спутниковых снимков территории Беларуси, сделанных прибором MERIS за 2002–2012 гг., и разработанных алгоритмов показано, что более 90 % вариаций средней за вегетационный период температуры подстилающей поверхности определяется тремя основными факторами: общим содержанием водяного пара в атмосфере, оптической толщиной аэрозоля и долей поглощаемой растительностью фотосинтетически активной радиации. Построены карты чувствительности температуры подстилающей поверхности к отмеченным факторам (рисунок 2), позволяющие без использования сложных моделей оценивать влияние аэрозольных загрязнений воздуха и степени озеленения территории на региональный климат. Количественно оценен форсинг температуры подстилающей поверхности, индуцированный растительным покровом, приводящий к тому, что с увеличением чистой первичной продуктивности с эквивалентным ростом доли поглощаемой фотосинтетически активной радиации на 10 %, дневная температура подстилающей поверхности уменьшится на $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ за счет большего суммарного испарения, а ночная увеличится $0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ за счет большего поглощения солнечной энергии в

течение дня. Показано, что в целом для Беларуси аэрозоли оказывают прогревающее воздействие на подстилающую поверхность, однако выяснение причин такого воздействия требует дальнейших исследований.

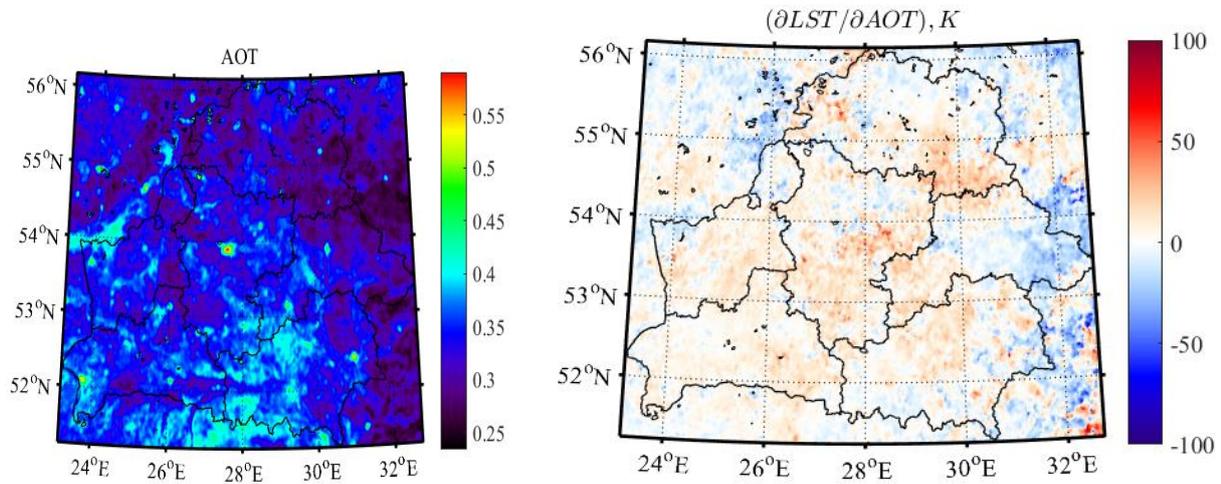


Рисунок 2. Осредненное распределение оптической толщины аэрозоля на длине волны 550 нм (AOT) и вариационные коэффициенты, связывающие дневную температуру подстилающей поверхности с AOT

Определение концентраций растворенных и взвешенных веществ в водоемах

Разработан метод определения концентраций хлорофилла, растворенных органических веществ и взвешенных частиц в водоемах с произвольными гидрооптическими характеристиками, использующий данные многоспектральных спутниковых сенсоров и аналитическую модель, описывающую вклады атмосферы и водной среды в результирующую яркость уходящего в космос излучения с погрешностями, не превышающими погрешность измерений. Метод позволяет одновременно получать карты распределений оптически активных компонентов водной среды и атмосферы вдоль полосы сканирования спутникового сенсора. Область его применения – регулярный автоматизированный мониторинг водоемов на предмет их санитарно-гигиенических свойств и биопродуктивности, исследование атмосферно-гидросферного цикла углерода для совершенствования климатических моделей.

В основе разработанного метода лежит аппроксимационно-аналитическая модель переноса излучения в системе атмосфера-водоем, учитывающая условия освещения и анизотропный характер отражения света взволнованной поверхностью [5]. Коэффициенты яркости, плоское и сферическое альbedo водной среды рассчитываются в явном виде в зависимости от первичных гидрооптических характеристик (средний косинус индикатрисы рассеяния, вероятность выживания кванта), зенитных и азимутальных углов освещения и наблюдения. Соотношение между потоками прямого и рассеянного солнечного излучения на нижней границе атмосферы рассчитывается в зависимости от давления воздуха, оптических толщин мелкодисперсной и грубодисперсной компонент аэрозоля, содержания озона и водяного пара в столбе атмосферы.

Разработанный метод программно реализован для прибора OLCI, работающего на спутниковой платформе Sentinel-3. В качестве примера его использования на рис. 3 приведены распределения концентраций хлорофилла и взвешенных частиц по поверхности Балтийского моря.

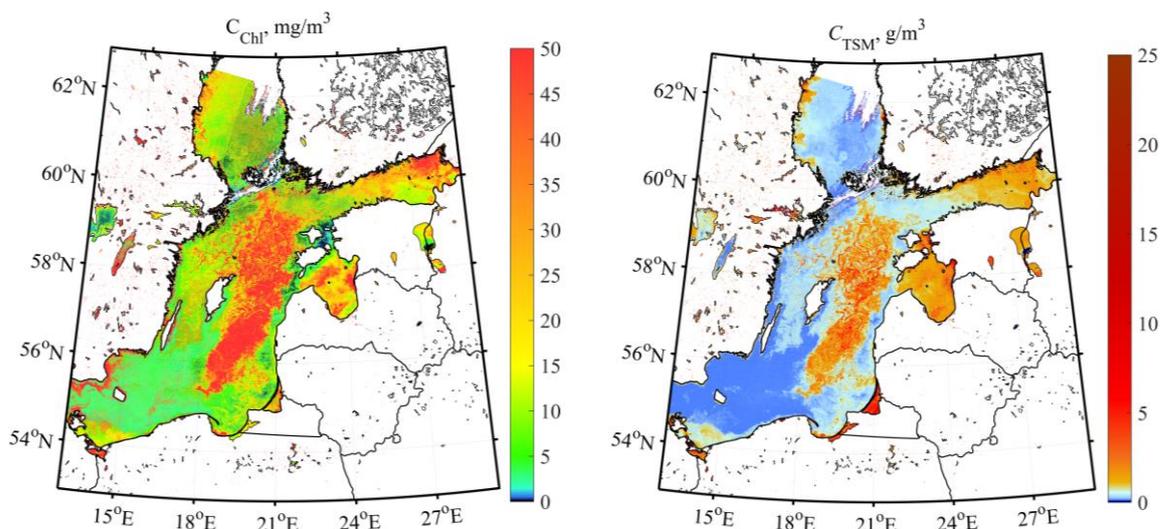


Рисунок 3. Карты распределений концентрации хлорофилла (C_{chl}) и взвешенных частиц (C_{TSM}) по поверхности Балтийского моря, полученные по данным спутникового сенсора OLCI разработанным методом

Определение доли поглощаемой растительностью фотосинтетически активной солнечной радиации

Доля солнечной радиации, поглощаемая растительным покровом (FAPAR), является важнейшим биоклиматическим параметром подстилающей поверхности (ПП), напрямую связанным с первичной продуктивностью фитосферы. Этот параметр используется во многих климатических моделях для оценок ассимиляции углекислого газа в процессе фотосинтеза, а также для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур.

Дистанционное определение FAPAR основывается на космических измерениях интенсивности солнечного излучения, отраженного системой «атмосфера–подстилающая поверхность». В большинстве известных алгоритмов оценки FAPAR по спутниковым данным используются теоретические или экспериментальные корреляции между FAPAR и спектральными вегетационными индексами природных объектов (EVI и NDVI). Такие алгоритмы имеют узкую область применения, поскольку не позволяют учесть влияние архитектуры растительного покрова, биохимического состава листа и оптических свойств почвы на интенсивность солнечного излучения, отраженного в направлении на спутник.

В докладе представлен новый алгоритм оценки FAPAR по коэффициентам яркости (КЯ) на верхней границе растительного покрова (R_{top}), регистрируемым в спектральных каналах спутникового прибора OLCI. В основе алгоритма лежит представление о ПП как о двухслойной рассеивающей среде «растительность-почва», КЯ которой определяются структурой и биохимическим составом листа, архитектурой растительности (индекс листовой поверхности, угловое распределение листвы, соотношение между средним размером листа и высотой растительного покрова), альбедо почвы и содержанием в ней влаги. Интенсивности излучения, однократно отраженного почвой и однократно рассеянного растительностью, вычисляются с учетом конечных размеров рассеивателей среды и эффектов их взаимного затенения. Последующие акты рассеяния в растительном покрове рассматриваются в рамках модели однородной среды с азимутально-усредненной индикатрисой рассе-

яния и коэффициентом ослабления, зависящим от среднего сечения листов в плоскости перпендикулярной направлению распространения излучения. В модели КЯ почвы однократное рассеяние описывается эмпирической индикатрисой, учитывающей наличие максимума отражения природных поверхностей в направлении, обратном падающему излучению. Многократное рассеяние света в почве предполагается изотропным и описывается двухпоточковым приближением.

Для восстановления FAPAR помимо индекса NDVI используются 3 первые главные компоненты спектра $R_{Toc}(\lambda)$, описывающие 99 % его вариаций. Уравнение, аппроксимирующее связь FAPAR со спектральными отражательными характеристиками растительного покрова, получено на основе модели переноса излучения. Пример восстановления распределения FAPAR для территории Беларуси приведен на рисунке 4.

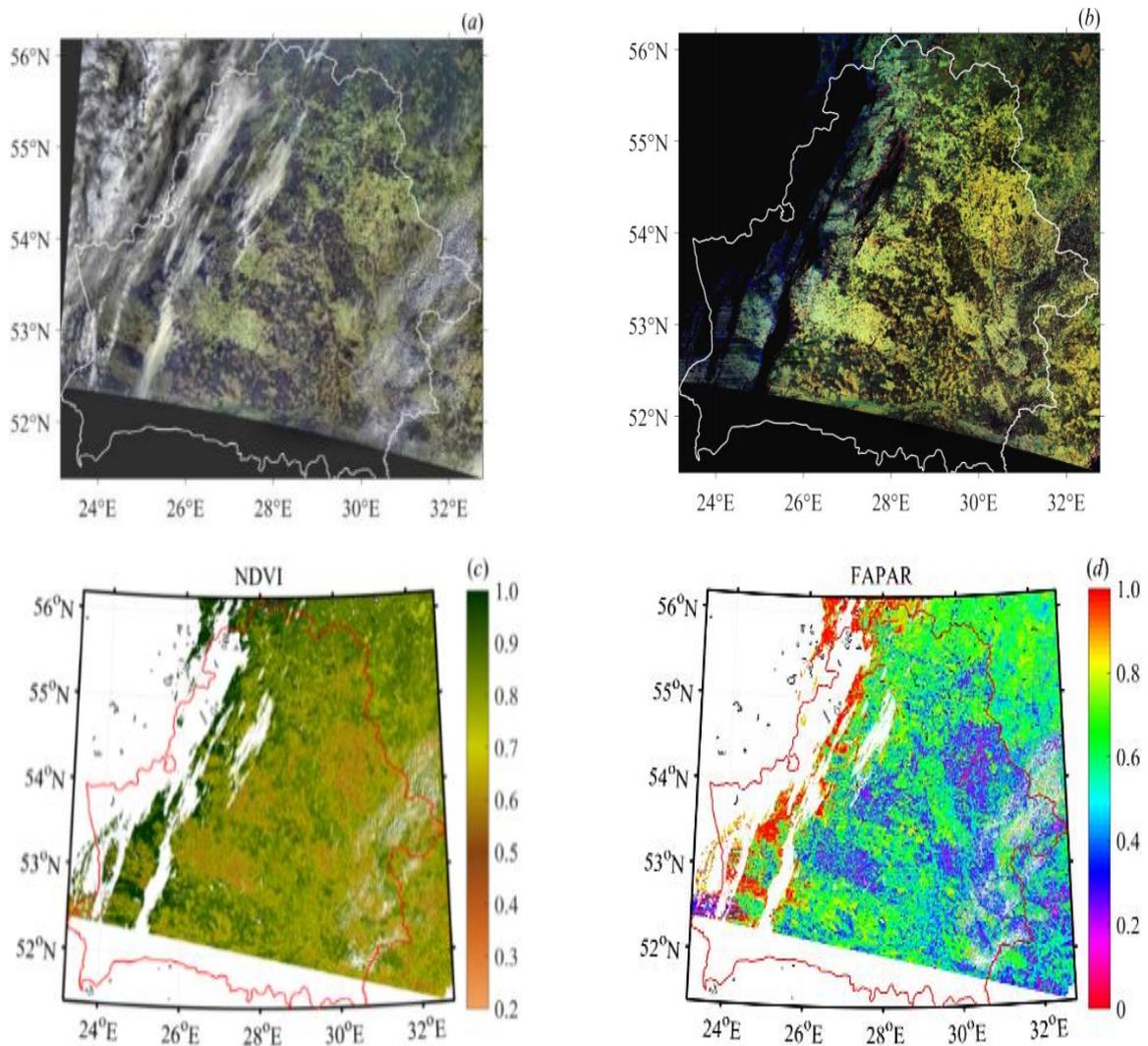


Рисунок 4. Результаты обработки космического изображения Земли, полученного 01.09.2017 прибором OLCI: *a* и *b* – псевдоцветной спутниковый снимок до и после атмосферной коррекции, *c* и *d* – пространственные распределения NDVI и FAPAR, восстановленные из спектральных коэффициентов яркости на нижней границе атмосферы

Литература

[1]Лысенко, С.А. Многочастотное лидарное зондирование микроструктуры многокомпонентных городских аэрозолей / С.А. Лысенко, М.М. Кугейко, В.В. Хомич // Журн. прикл. спектр. – 2015. – Т. 82, № 1. – С. 115–123.

[2]Лысенко, С.А. Верификация алгоритма обработки данных многочастотного лидарного зондирования аэрозоля / С. А. Лысенко, В. В. Хомич // Журн. прикл. спектр. – 2018. – Т. 85, № 3. – С. 491–498.

[3]Лысенко, С.А. Алгоритм восстановления интегрального содержания водяного пара в атмосфере над поверхностью суши по данным спутникового спектрорадиометра / С.А. Лысенко // Журн. прикл. спектр. – 2017. – Т. 84, № 2. – С. 278–288.

[4]Lysenko S. A. Fast algorithm for retrieval of the atmospheric fine particulate matter maps from the multispectral satellite images / S. A. Lysenko // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, № 9. P. 763–774.

[5]Lysenko S. A. Atmospheric correction of multispectral satellite images based on the approximate model of the solar radiation transfer / S. A. Lysenko // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V.30, № 9. P. 775–788.

AEROSPACE TECHNOLOGIES OF ENVIRONMENTAL AND BIOCLIMATIC MONITORING OF ENVIRONMENT

S.A. LYSENKO

*Deputy Director of the Institute for Nature
Management of National Academy of
Science of Belarus, Doctor of Physical
and Mathematical Science*

*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Belarus*

E-mail: lysenkorfe@gmail.com

Abstract. The article presents the latest developments of the author in the area of environmental (atmosphere, land and water surfaces) monitoring methods based on optical remote sensing. Problems of determining the aerosol optical thickness, mass concentrations of respirable aerosol fractions, concentrations of dissolved and suspended particles in water bodies are considered.

Keywords: optical remote sensing, ecological monitoring.