

ТЕХНОЛОГИЯ ДЕКОМПОЗИЦИИ ОТРАЖЕННОЙ РАДИАЦИИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

В. Б. КИСЕЛЕВ

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

СПИИРАН, 14-я линия ВО, д. 39, Санкт-Петербург, 199178

<kisselev@spiiras.nw.ru>

УДК 550.30-5:535.36

Киселев В. Б. Технология декомпозиции отраженной радиации в программном комплексе обработки данных дистанционного зондирования поверхностных вод // Труды СПИИРАН. Вып. 3, т 1. — СПб.: Наука, 2006.

Аннотация. *Рассматриваются различные способы декомпозиции радиации, измеряемой в процессе дистанционного зондирования, на отраженную исследуемым водным объектом и шумовую, порожденную наличием атмосферных слоев, составляющие. Анализируются достоинства и недостатки рассматриваемых способов с точки зрения их использования в технологической схеме обработки аэрокосмических снимков водных объектов. — Библ. 6 назв.*

UDC 550.30-5:535.36

Kisselev V. B. The technology of decomposition of reflected radiation in the program for processing of surface water remote sensing data // SPIIRAS Proceedings. Issue 3, vol. 1. — SPb.: Nauka, 2006.

Abstract. *Different approaches to decomposition of measured upward radiation into the component reflected by the water object and the noise component, generated by the reflection from atmospheric layers are considered. Advantages and disadvantages of the considered approaches are analyzed from the point of view of their application for the retrieval of surface water quality from the remote sensing observations. — Bibl. 6 items.*

Дистанционное определение компонентного состава поверхностных вод основано на обработке результатов измерений уходящей радиации. Последняя всегда включает как полезный сигнал, т.е. радиацию, отраженную исследуемым водным объектом, так и шумовую составляющую, порожденную отражением радиации от атмосферы, находящейся между объектом и измерительным прибором. Методология декомпозиции измеренных полей радиации на полезную и шумовую составляющие является существенным элементом процесса обработки, во многом определяя точность получаемых результатов.

Возможность декомпозиции поля отраженной радиации определяется различным типом спектральной зависимости оптических характеристик атмосферы и водной среды, входящих в качестве параметров в уравнение переноса излучения [1]:

$$\eta \frac{\partial}{\partial \tau} I(\tau, \eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W) = -I(\tau, \eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W) + \frac{\Lambda(\tau, \nu, A, W)}{4\pi} \int_{\Omega} \chi(\gamma; \tau, \nu, A, W) I(\tau, \eta, \eta', \varphi - \varphi'; \nu, A, W) d\eta' d\varphi', \quad (1)$$

где (η, φ) — косинус полярного угла и азимут направления распространения радиации (азимут отсчитывается от плоскости солнечного вертикала), ζ — косинус угла солнца, τ — оптическая глубина точки наблюдения, отсчитываемая вниз от верхней границы среды, ν — частота излучения, а символами A и W

обозначены совокупности физических характеристик соответственно атмосферы и водной среды. Граничные условия для этой задачи имеют вид (стрелками в верхнем индексе явно указаны восходящая и нисходящая составляющие поля излучения):

а) на верхней границе

$$I^\downarrow(0; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W) = \delta(\eta - \zeta, \varphi); \quad \eta > 0, \quad (2)$$

б) на границе раздела атмосферы и водной среды

$$\begin{aligned} I^\uparrow(\tau_w^-; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W) &= T_F^\uparrow I^\uparrow(\tau_w^+; \eta_t, \zeta, \varphi; \nu, A, W) + R_F^\downarrow I^\downarrow(\tau_w^-; -\eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W); \quad \eta < 0 \\ I^\downarrow(\tau_w^+; \eta_t, \zeta, \varphi; \nu, A, W) &= T_F^\downarrow I^\downarrow(\tau_w^-; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W) + R_F^\uparrow I^\uparrow(\tau_w^+; -\eta_t, \zeta, \varphi; \nu, A, W); \quad \eta > 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$I^\downarrow(\tau_w^+; \eta_t, \zeta, \varphi; \nu, A, W) = I^\uparrow(\tau_w^+; -\eta_t, \zeta, \varphi; \nu, A, W); \quad \eta_c > \eta_t > 0,$$

где R_F и T_F — коэффициенты отражения и пропускания границы раздела сред, и стрелки в верхнем индексе указывают, к какому направлению распространения излучения относится коэффициент, η_t — косинус соответствующего η угла преломления, т.е.

$$\eta_t^2 = 1 - \frac{1}{n^2}(1 - \eta^2), \quad (4)$$

n — коэффициент преломления воды, η_c — косинус угла полного внутреннего отражения, τ_w — оптическая глубина границы сред, а индексами «+» и «-» указано соответственно рассматривается ли конкретная интенсивность как предел сверху или предел снизу при приближении к границе;

в) на нижней границе

$$I^\uparrow(\tau; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W) \Big|_{\tau \rightarrow \infty} = 0; \quad \eta < 0. \quad (5)$$

С целью декомпозиции излучения на составляющие, зависящие от характеристик каждой из рассматриваемых сред поотдельности, введем два специальных решения уравнения (1) I_t и I_b со следующими граничными условиями:

1) на верхней границе

$$I^\downarrow(0; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) = \delta(\eta - \zeta, \varphi); \quad \eta > 0, \quad (6)$$

$$I^\downarrow(0; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) = 0; \quad \eta > 0,$$

2) на границе раздела сред

$$I^\uparrow(\tau_w^+; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) = 0; \quad \eta < 0, \quad (7)$$

$$I^\uparrow(\tau_w^+; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) = \delta(\eta - \zeta, \varphi); \quad \eta < 0.$$

Очевидно, что оба решения определяются исключительно параметрами атмосферы. Необходимо обратить внимание на то, что нижние граничные условия ставятся под границей раздела сред, т.е. отражение и преломление света на границе в них учитывается.

Используя эти решения можно записать, что в атмосфере:

$$\begin{aligned} I^\uparrow(\tau; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) &= I_t^\uparrow(\tau; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) + \\ &+ \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^{-\eta_c} d\eta' \int_0^{2\pi} d\varphi' I(\tau_w^+; \eta', \zeta, \varphi'; \nu, A, W) I_b^\uparrow(\tau; \eta, \eta', \varphi - \varphi'; \nu, A), \end{aligned} \quad (8)$$

где учтено, что I_b отлично от нуля только при $\eta < -\eta_c$ вследствие эффекта полного внутреннего отражения. Соотношение (8) является точным и составляет основу для дальнейшей декомпозиции полей излучения, что возможно только при введении дополнительных допущений.

Один из возможных способов декомпозиции, использованный в реализованной ранее технологии восстановления параметров вод по данным дистанционного зондирования [2,3], основывается на известной формуле Гордона [4]:

$$R(\zeta, \nu, W) = (0.975 - 0.629\zeta) \frac{b_b}{a + b_b}, \quad (9)$$

где

$$R(\zeta, \nu, W) = \frac{F_u}{F_d}, \quad (10)$$

F_u и F_d — восходящий и нисходящий потоки излучения под поверхностью раздела, a и b_b — коэффициенты поглощения и обратного рассеяния водной среды. Полагая коэффициент отражения водной среды малой величиной, что, как правило, имеет место, можно считать, что:

$$F_d(\zeta, \nu, A) = \int_0^1 \eta d\eta \int_0^{2\pi} d\varphi I_t^\downarrow(\tau_W^+; \eta, \zeta, \varphi; A) \quad (11)$$

и записать (8) в виде:

$$I^\uparrow(\tau, \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) = I_t^\uparrow(\tau, \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) + F_d(\zeta, \nu, A) R(\zeta, \nu, W) \times \\ \times \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^{-\eta_c} d\eta' \int_0^{2\pi} d\varphi' \frac{I(\tau_W^+; \eta', \zeta, \varphi'; \nu, A, W)}{F_u} I_b^\uparrow(\tau, \eta, \eta', \varphi - \varphi'; \nu, A). \quad (12)$$

Атмосферные индикатрисы рассеяния, как правило, являются сильно вытянутыми функциями, и поэтому можно считать, что решение I_b , рассматриваемое как функция (η', φ') имеет пик в направлении (η, φ) . Это позволяет заменить (η', φ') на (η, φ) в оставшейся части подинтегрального выражения. Тогда:

$$I^\uparrow(\tau, \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) = I_t^\uparrow(\tau, \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) + \\ + F_d(\zeta, \nu, A) \frac{R(\zeta, \nu, W)}{Q(\eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W)} T(\tau, \eta, \varphi; A), \quad (13)$$

где введены обозначения:

$$Q(\eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W) = \frac{F_u}{I(\tau_W^+; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W)} \\ T(\tau, \eta, \varphi; A) = \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^{-\eta_c} d\eta' \int_0^{2\pi} d\varphi' I_b^\uparrow(\tau, \eta, \eta', \varphi - \varphi'; \nu, A). \quad (14)$$

Величина T имеет смысл прозрачности атмосферного слоя и данное определение отличается от стандартного тем, что включает также и прозрачность границы раздела атмосферы и водной среды. Отношение восходящего потока к интенсивности часто используется при анализе отражения от водной среды и носит название Q -фактора.

Как видно из выражения (13) зависимость интенсивности от физических характеристик водной среды сосредоточена в отношении коэффициента отражения водной массы R и Q -фактора. Это позволяет эффективно организовать предвычисление и хранение предвычисленных спектральных зависимостей интенсивности для различных состояний атмосферы, используя только один характеризующий водную массу числовой параметр. В качестве такого параметра выбирается эффективное альbedo. Водная масса заменяется ортотропным отражателем, для которого

$$\frac{R(\zeta, \nu, W)}{Q(\eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W)} = \pi A_{\text{eff}} \quad (15)$$

и предвычисленные спектральные зависимости отраженной интенсивности хранятся в базе данных как функции A_{eff} . При восстановлении характеристик водоема осуществляется поиск в базе данных значений эффективного альbedo, соответствующих измеренным в различных областях спектра интенсивностям, а эффективные альbedo затем пересчитываются в реальные коэффициенты отражения с использованием другой базы данных, в которой хранятся значения Q -факторов. На последнем этапе обращением формулы (9) определяются концентрации компонентов водной среды для характерных для рассматриваемого водоема удельных коэффициентов поглощения и обратного рассеяния этих компонентов.

Изложенная схема декомпозиции успешно использовалась для обработки аэрокосмических снимков водных объектов [2,3] и показала достаточную эффективность. Трудности в реализации изложенной схемы связаны с организацией базы данных Q -факторов. Эти величины зависят, как видно из приведенных выше выражений, от физических характеристик обеих сред, так что хранение их для полного набора всех возможных значений параметров привело бы к слишком большому объему базы данных и увеличению времени поиска. Для уменьшения объема базы используется тот факт, что зависимость Q -факторов от физических параметров сред сравнительно слабая и возможно ограничиться хранением данных только для некоторых средних состояний среды. Однако, при слабой зависимости чрезвычайно велика спектральная изменчивость коэффициента поглощения в атмосфере вследствие наличия линий поглощения в ее газообразных составляющих, что приводит к заметному спектральному тренду Q -факторов. По этой причине, для сохранения необходимой точности приходится сохранять в базе данных значения Q -факторов для всего спектрального диапазона. Вместе с тем, постоянное возрастание скорости вычислений современных компьютеров позволяет предложить более совершенные подходы, ориентируясь на выполнение большего объема расчетов в процессе обработки.

Так, альтернативным способом декомпозиции может служить организация базы данных коэффициентов яркости водной массы. Этот коэффициент может быть вычислен как решение уравнения переноса излучения (1) на верхней границе при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} I^{\downarrow}(\tau_w^-; \eta, \zeta, \varphi; \nu, W) &= \delta(\eta - \zeta, \varphi); & \eta > 0 \\ I^{\uparrow}(\tau_w^-; \eta, \zeta, \varphi; \nu, W) &= T_F^{\uparrow} I^{\uparrow}(\tau_w^+; \eta_t, \zeta, \varphi; \nu, W); & \eta < 0 \\ I^{\downarrow}(\tau_w^+; \eta_t, \zeta, \varphi; \nu, W) &= T_F^{\downarrow} I^{\downarrow}(\tau_w^-; \eta, \zeta, \varphi; \nu, W) + R_F^{\uparrow} I^{\uparrow}(\tau_w^+; -\eta_t, \zeta, \varphi; \nu, W); & \eta > 0 \\ I^{\downarrow}(\tau_w^+; \eta_t, \zeta, \varphi; \nu, W) &= I^{\uparrow}(\tau_w^+; -\eta_t, \zeta, \varphi; \nu, W); & \eta_c > \eta_t > 0 \end{aligned} \quad (16)$$

и граничном условии (5) на нижней границе. Коэффициент яркости $\rho(\eta, \zeta, \varphi; \nu, W)$ определяется как:

$$\rho(\eta, \zeta, \varphi; \nu, W) = \frac{1}{\zeta} I^{\uparrow}(\tau_W^-; \eta, \zeta, \varphi; \nu, W). \quad (17)$$

Учитывая, что коэффициент яркости водной толщи обычно мал, можно пренебречь многократными отражениями от нее падающего света и с достаточной степенью точности принять восходящую радиацию под поверхностью раздела сред равной:

$$I(\tau_W^+; \eta, \zeta, \varphi; \nu, A, W) \approx \int_0^1 d\eta' \int_0^{2\pi} d\varphi' \rho(\eta, \eta', \varphi - \varphi'; \nu, W) I_t^{\downarrow}(\tau, \eta', \zeta, \varphi'; \nu, A). \quad (18)$$

Тогда, используя сильную вытянутость атмосферных индикатрис, соотношение (8) для восходящей радиации в атмосфере запишется в виде:

$$I^{\uparrow}(\tau, \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) = I_t^{\uparrow}(\tau, \eta, \zeta, \varphi; \nu, A) + T(\tau, \eta, \varphi; A) \int_0^1 d\eta' \int_0^{2\pi} d\varphi' \rho(\eta, \eta', \varphi - \varphi'; \nu, W) I_t^{\downarrow}(\tau, \eta', \zeta, \varphi'; \nu, A), \quad (19)$$

где зависимость от параметров водоема сосредоточена исключительно в величине $\rho(\eta, \zeta, \varphi; \nu, W)$.

Декомпозиция (19) заменяет ранее используемое соотношение (13). Преимущество (19) заключается в том, что коэффициенты яркости водной толщи, в отличие от входящих в (13) Q-факторов, не зависят от параметров атмосферного слоя и, как следствие, хранение предвычисленных значений может быть организовано более эффективно, чем в предыдущем случае. Это связано с возможностью замены параметризации состояния водного объекта в виде (ν, W) , т.е. частоты излучения и совокупности физических параметров, параметризацией в виде совокупности оптических параметров W_{opt} . Для наиболее распространенной однослойной модели водоема переход к новой системе параметров выполняется следующим образом.

Традиционно используемая совокупность физических параметров водной среды включает (глубину водоема временно исключим из рассмотрения, поскольку она не связана с частотной зависимостью) концентрации хлорофилла c_c , взвешенных частиц c_p и растворенной органики c_y , а спектральная зависимость определяется выбором характерных для исследуемого водоема зависимостей от частоты удельных коэффициентов рассеяния и поглощения соответствующих компонент. Совокупность оптических параметров водного слоя состоит из коэффициентов рассеяния и поглощения среды в целом, а также индикатрисы рассеяния, обычно представленной в параметрической форме, зависящей от выбранной модели водной среды. Поскольку рассеяние в водной среде складывается из рассеяния гидрозолеи и релеевского рассеяния собственно водой, индикатриса представима в виде:

$$x(\gamma) = \frac{1}{b^{(h)} + b^{(w)}} \left[b^{(h)} x_h(\gamma) + b^{(w)} x_w(\gamma) \right], \quad (20)$$

где $b^{(h)}$ и $b^{(w)}$ — коэффициенты рассеяния гидрозолеи и чистой водой, $x_h(\gamma)$ и $x_w(\gamma)$ — соответствующие индикатрисы рассеяния. Как показывают измерения

в природных водоемах, форма индикатрисы рассеяния света гидрозодем при рассеянии назад слабо зависит от параметров гидрозоля в реальном диапазоне их изменения. Изменения параметров гидрозоля влияют, в основном, на соотношение интенсивности рассеяния в направлении падающего света и в обратном направлении. В связи с этим для индикатрисы гидрозоля может быть выбрано однопараметрическое представление, и в качестве параметра принято отношение обратного рассеяния $b_b^{(h)}$:

$$b_b^{(h)} = \frac{1}{2} \int_{-1}^0 x_w(\gamma) d\gamma, \quad (21)$$

где интегрирование выполняется по косинусу угла рассеяния, а коэффициент перед интегралом связан с выбранным способом нормировки индикатрис.

Таким образом, совокупность оптических параметров, полностью характеризующая водную среду состоит из полного коэффициента поглощения a , коэффициентов рассеяния гидрозодем и чистой водой $b^{(h)}$ и $b^{(w)}$, а также отношения обратного рассеяния гидрозодем $b_b^{(h)}$. Для рассмотрения мелководных участков к ним, безусловно, должна быть добавлена глубина водоема. Основным достоинством данной параметризации является возможность отказаться от хранения частотной зависимости предвычисленных значений, значительно сокращая объем хранимых данных и время поиска в соответствующей базе. Расчет частотной зависимости отраженной радиации для конкретного физического состояния водоема выполняется по формулам:

$$\begin{aligned} a &= c_c a_c^*(\nu) + c_p a_p^*(\nu) + c_y a_y^*(\nu) + a_w(\nu); \\ b^{(h)} &= c_p b_p^*(\nu); \\ b^{(w)} &= b^{(w)}(\nu); \\ b_b^{(h)} &= b_b^{(w)}(\nu), \end{aligned} \quad (22)$$

где зависимости удельных коэффициентов поглощения всех компонентов среды от частоты, как и в предыдущем способе декомпозиции, полагаются известными для каждого исследуемого водоема. Далее для каждого набора вычисленных оптических параметров в базе предвычисленных значений коэффициента яркости отыскиваются необходимые данные, которые после их подстановки в выражение (19) позволяют определить интенсивность восходящей радиации в атмосфере. Все прочие, кроме коэффициента яркости, входящие в (19) величины зависят только от параметров атмосферы и извлекаются из отдельной базы данных.

Еще одним преимуществом использования декомпозиции (19) по сравнению с (13) является отказ от использования формулы Гордона (9). Эта формула хорошо проверена и обеспечивает достаточную точность при умеренных коэффициентах рассеяния водной среды, т.е. при невысоких концентрациях гидрозоля. При возрастании коэффициента рассеяния погрешности возрастают, что проиллюстрировано на рис. 1, где формула Гордона сравнивается с результатами высокоточного численного решения уравнения переноса излучения методом конечных элементов [5,6]. Как видно из рисунка, при отношениях коэффициента рассеяния к коэффициенту поглощения порядка 2 расчеты по формуле Гордона практически совпадают с точными результатами. При вели-

чине этого отношения порядка 10 точность формулы достаточна лишь при не-больших коэффициентах обратного рассеяния. При дальнейшем возрастании коэффициента рассеяния погрешности практически всегда составляют десятки процентов.

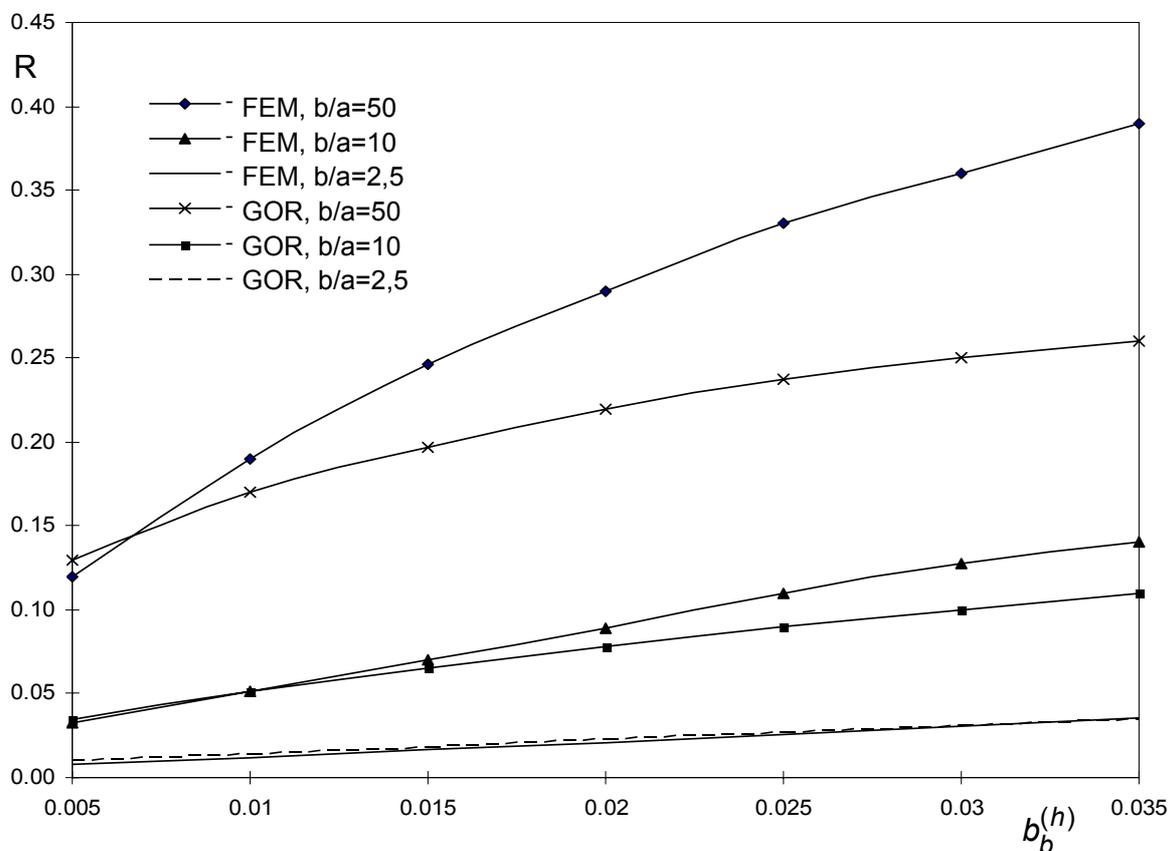


Рис. 1. Коэффициент отражения водной массы в зависимости от отношения обратного рассеяния для зенитного угла солнца 30° : FEM — численный расчет, GOR — формула Гордона.

Методология декомпозиции отраженной радиации с использованием коэффициентов яркости водной массы позволяет, таким образом, повысить оперативность и точность обработки аэрокосмических снимков водных объектов, в особенности поверхностных вод с высоким содержанием гидрозоля.

Литература

1. *Соболев В. В.* Рассеяние света в атмосферах планет. М.: Наука, 1972. 335 с.
2. *Киселев В. Б., Хееге Т., Микса С.* Компьютерная технология восстановления качества природных вод по данным дистанционных наблюдений // Труды СПИИРАН. 2004. Вып. 2, т. 2. С. 417–423.
3. *Heege T., Miksa S., Kisselev V.* Physically based methodology for coupled retrieval of aerosol and water composition from hyperspectral remote sensing data // Proc. III International Conference "Current Problems in Optics of Natural Waters". 2005. P. 205–209.
4. *Gordon H. R., Brown O. B., Jacobs M. M.* Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean // Applied Optics. 1975. Vol. 14. P. 417–427.
5. *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. Vol. 34. P. 8460–8471.
6. *Bulgarelli B., Kisselev V.B., Roberti L.* Radiative transfer in the atmosphere-ocean system: the finite element method // Applied Optics. 1999. Vol. 38. P. 1530–1542.