

Верификация спутниковых биооптических алгоритмов для Каспийского моря по судовым данным

И.В. Рыбакова^{1,2}, О.В. Копелевич², В.И. Буренков²,
С.В. Шеберстов², С.В. Вазюля²

¹ *Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,
141980 Дубна, Университетская 19*

² *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
inna15@me.com*

Применение стандартных биооптических алгоритмов, разработанных для спутниковых сканеров SeaWiFS и MODIS-Aqua, для большинства морей России может приводить к большим ошибкам при расчете концентрации хлорофилла и взвешенного вещества, поскольку стандартные алгоритмы выведены в основном для вод открытого океана. Для морей России на основе данных натуральных измерений разработаны региональные алгоритмы, которые учитывают региональные особенности исследуемых вод.

В настоящей работе представлены модифицированные алгоритмы для расчета концентрации хлорофилла и взвеси в северной половине Каспийского моря, выведенные с использованием новых данных натуральных измерений в экспедициях НИС «Рифт» в 2008-2009 гг. Посредством плавающего спектрорадиометра измерялись спектральные величины коэффициента яркости излучения, выходящего из водной толщи, и прямыми методами определялись концентрации хлорофилла и взвеси.

Ключевые слова: сканеры цвета MODIS, SeaWiFS, модифицированные алгоритмы, спектрорадиометр, биооптические характеристики, концентрация хлорофилла, концентрация взвешенного вещества.

Введение

Данные спутниковых сканеров цвета позволяют рассчитывать биооптические характеристики морской воды в поверхностном слое моря, в частности концентрации хлорофилла и взвеси. Для обработки данных сканеров цвета существуют стандартные алгоритмы NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Это эмпирические (регрессионные) алгоритмы, основанные на использовании выведенных по данным натуральных измерений статистических соотношений между определяемым биооптическим параметром и отношением яркостей восходящего от поверхности излучения для выбранных длин волн. Поскольку статистические соотношения, используемые в стандартных алгоритмах, выведены в основном по данным натуральных измерений для океанских вод, они могут давать большие ошибки для морей России, поскольку не учитывают региональные особенности последних (Kopelevich et al., 2004, 2008, 2009). Это относится, в частности, к Каспийскому морю, особенно к Северному Каспию, который находится под сильным влиянием речного стока; для таких регионов нужно использовать региональные алгоритмы (Kopelevich et al., 2009).

В настоящей статье представлены модифицированные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла и взвеси для Каспийского моря, выведенные с учетом новых данных натуральных измерений, которые не использовались для разработки ранее использовавшихся алгоритмов (Kopelevich et al., 2009).

Оценка применимости ранее выведенных алгоритмов для новых данных натуральных измерений

В экспедициях 2008-2009 гг. на НИС «Рифт» были получены новые данные натуральных измерений в Каспийском море. Эти данные интересны тем, что часть из них получена в

осенний и весенний сезоны (ноябрь 2008 г. – 29-й рейс и апрель 2009 г. - 30 рейс), а часть – в южной половине Каспийского моря (32-й рейс - сентябрь 2009 г.). Используемые ранее алгоритмы основаны на данных, полученных для летнего сезона в северной половине Каспийского моря. Помимо вышеуказанных рейсов, для анализа использовались также данные 27-го рейса, проведенного в июле-августе 2008 г.

Анализируемые данные включали результаты измерений спектральной яркости морской воды, выполненных с помощью плавающего спектрорадиометра (Артемьев и др., 2000), а также данные прямых определений концентраций хлорофилла *a* и взвешенного вещества, выполненных на пробах по стандартной методике. Всего анализировались данные, полученные на 33 станциях в экспедициях 2008-2009 гг. Карта с расположением этих станций представлена на рис. 1.

По данным измерений плавающим спектрорадиометром, выполненным в вышеуказанных рейсах, с помощью ранее выведенного алгоритма были рассчитаны концентрации хлорофилла *a* (Chl_{ro}). На рис. 2 показаны результаты сравнения рассчитанных (Chl_{ro}) и измеренных *in situ* (Chl_{meas}) концентраций хлорофилла. Как видно из рисунка, рассчитанные концентрации хлорофилла достаточно хорошо согласуются с измеренными данными 27-го (июль-август 2008 г.), тогда как для других рейсов согласие неудовлетворительное.

Последнее можно объяснить различием сезонов (ноябрь и апрель, в то время как используемый алгоритм разработан по данным для летнего сезона), а также различием регионов (в сентябре 2009 г. измерения выполнялись в Среднем и Южном Каспии, тогда как алгоритм разработан по данным для северной половины Каспийского моря). По-видимому, в другие сезоны, а также для южной половины Каспийского моря нужны дополнительные региональные алгоритмы. К сожалению, имеющихся данных натуральных измерений пока еще недостаточно, чтобы разработать такие алгоритмы.

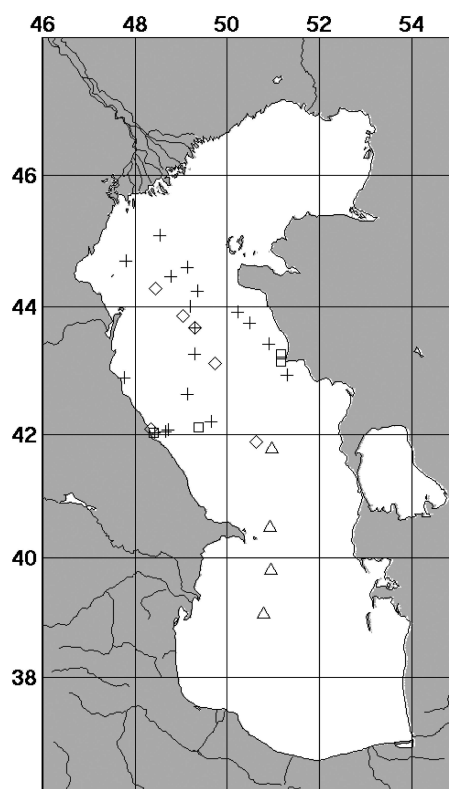


Рис. 1. Карта с расположением дрейфовых станций в Каспийском море, на которых проводились измерения биооптических характеристик

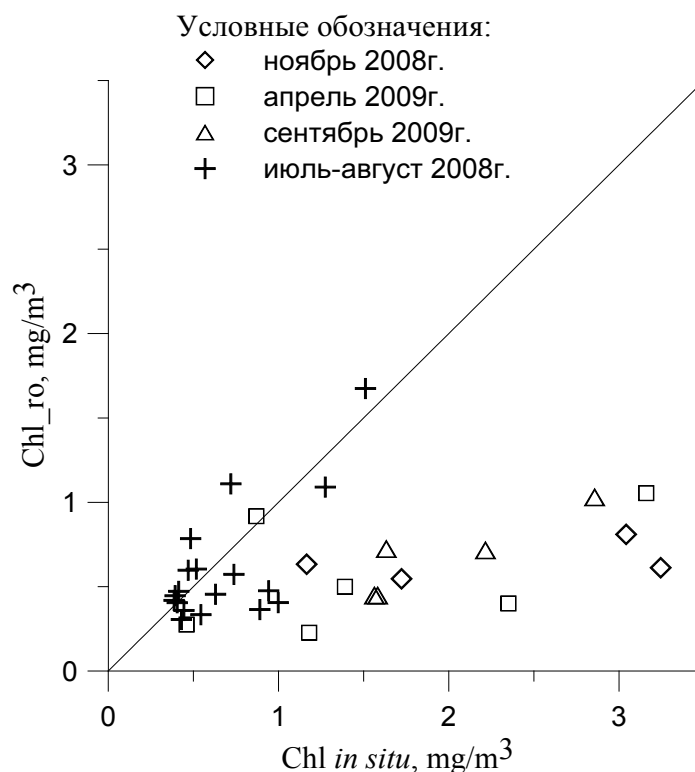


Рис. 2. Сравнение показателей концентраций хлорофилла, рассчитанных с использованием данных спектро-радиометра (Chl_{ro}), и измеренных *in situ* (Chl_{meas})

Таким образом, при модификации алгоритмов по расчету концентраций хлорофилла а и взвешенного вещества в качестве дополнительных данных можно использовать только результаты экспедиции летнего периода 2008г.

Модифицированные региональные алгоритмы по данным сканеров цвета MODIS и SeaWiFS

Данные 27-ого рейса (июль-август 2008 г.) использовались совместно с данными летних экспедиций 2003, 2004 и 2006 гг. для разработки модифицированного алгоритма. Всего для вывода модифицированных алгоритмов для расчета концентрации хлорофилла по данным сканеров цвета MODIS и SeaWiFS использовались данные 55 станций.

Региональный алгоритм для расчета концентрации хлорофилла по данным сканера цвета SeaWiFS

Для расчета концентрации хлорофилла по данным сканера цвета SeaWiFS использовалась ранее выведенная формула (Kopelevich et al., 2009):

$$Chl = A [L_{wn}(555)/L_{wn}(510)]^{-B}, \quad (1)$$

где $L_{wn}(555)$ и $L_{wn}(510)$ – нормализованные яркости излучения, восходящего от поверхности воды, на длинах волн 555 и 510 нм (Kopelevich et al., 2009). Коэффициенты A и B находились методом наименьших квадратов.

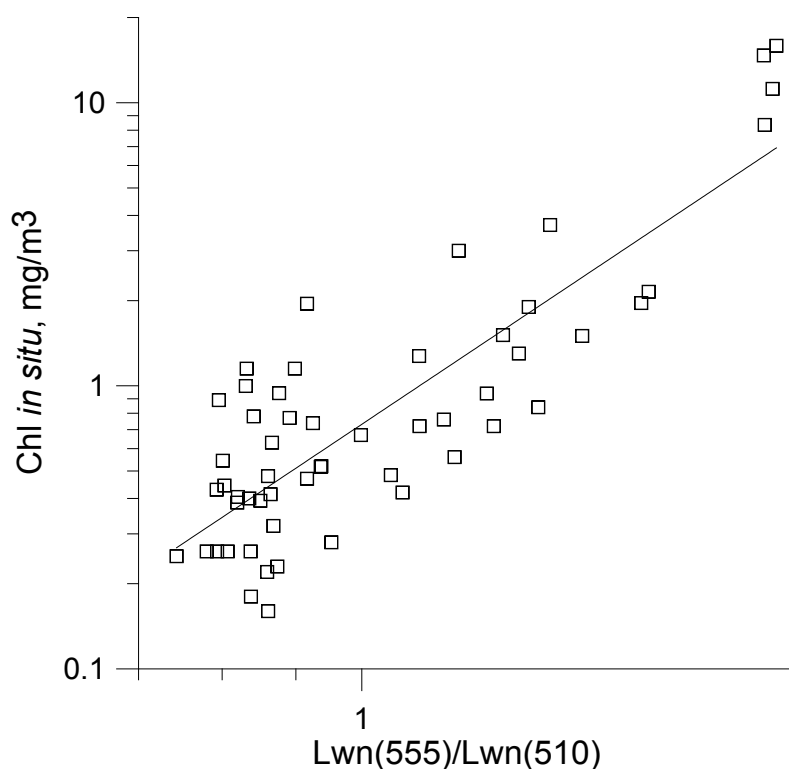


Рис. 3. Зависимость между измеренной концентрацией хлорофилла (*Chl in situ*) и отношением нормализованных яркостей на длинах волн 555 нм и 510 нм ($L_{wn}(555)/L_{wn}(510)$)

На рис. 3 в логарифмическом масштабе представлена зависимость между измеренной концентрацией хлорофилла и отношением нормализованных яркостей на длинах волн 555 нм и 510 нм.

Сплошная линия отображает выведенное уравнение регрессии:

$$\ln(Y) = 3.395 * \ln(X) - 0.312, \quad (2)$$

количество данных $n=55$, коэффициент детерминации $R^2 = 0.708$, ошибка уравнения регрессии равна 0.333.

Формула (1) имеет, соответственно, вид:

$$Chl = 0.732 [L_{wn}(555)/L_{wn}(510)] - 3.40. \quad (3)$$

Коэффициенты A и B изменились незначительно – ранее их значения равнялись 0.766 и 3.71 (Kopelevich et al., 2009).

Региональный алгоритм для расчета концентрации хлорофилла по данным сканера цвета MODIS-Aqua

В ранее выведенном алгоритме концентрация хлорофилла определялась по данным MODIS-Aqua как полусумма Chl_1 и Chl_2 , где Chl_1 рассчитывался через отношение нормализованных яркостей $L_{wn}(488)/L_{wn}(551)$, а Chl_2 - $L_{wn}(531)/L_{wn}(551)$ (Kopelevich et al., 2009).

Для вывода модифицированного алгоритма по расширенному набору данных рассчитывались два уравнения регрессии (рис. 4 и 5).

Для зависимости Chl vs. $L_{wn}(488)/L_{wn}(551)$ уравнение регрессии имеет вид:

$$\ln(Y) = -2.39 * \ln(X) - 0.461, \quad (4)$$

количество данных $n=55$, $R^2 = 0,688$, ошибка уравнения регрессии равна 0,355.

Для зависимости Chl vs. $L_{wn}(531)/L_{wn}(551)$ (рис.5) уравнение регрессии имеет вид:

$$\ln(Y) = -7.17 * \ln(X) - 0.096, \quad (5)$$

количество данных $n=55$, $R^2 = 0,638$, ошибка уравнения регрессии равна 0,412.

Сравнение полученных результатов показывает небольшое преимущество уравнения (4), т.е. целесообразно использовать отношение $L_{wn}(488)/L_{wn}(551)$.

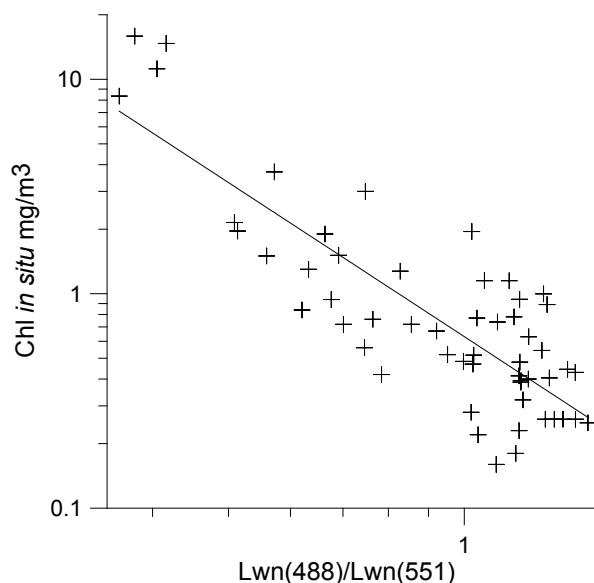


Рис. 4. Зависимость между измеренной концентрацией хлорофилла (Chl in situ) и отношением нормализованных яркостей на длинах волн 488 нм и 551 нм ($L_{wn}(488)/L_{wn}(551)$)

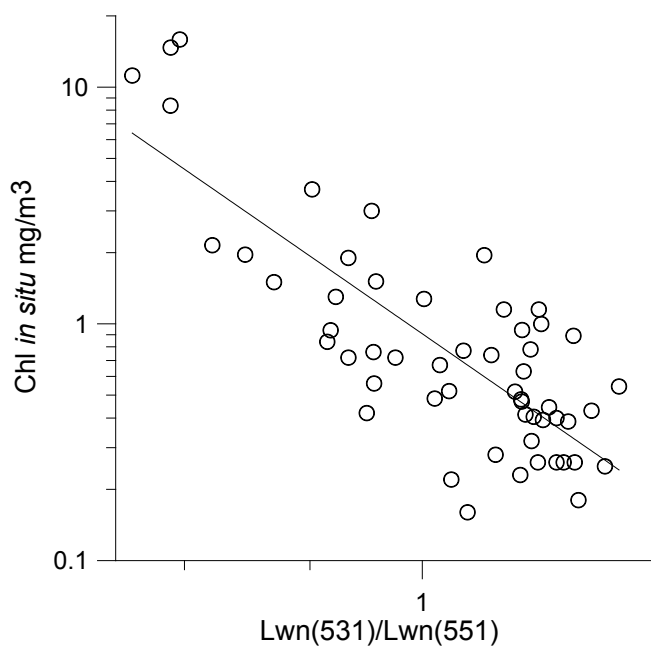


Рис. 5. Зависимость между измеренной концентрацией хлорофилла (Chl in situ) и отношением нормализованных яркостей на длинах волн 531 нм и 551 нм ($L_{wn}(531)/L_{wn}(551)$)

В настоящее время вместо нормализованной яркости L_{wn} используется коэффициент отражения дистанционного зондирования R_{rs} ; эти величины связаны друг с другом формулой $L_{wn}(\lambda) = F_0(\lambda) * R_{rs}(\lambda)$, где $F_0(\lambda)$ – нормальная облученность, создаваемая солнечным излучением на верхней границе атмосферы; вместо длины волны 551 нм значения R_{rs} даются для длины волны 547 нм. Окончательно модифицированный региональный алгоритм для расчета концентрации хлорофилла по данным MODIS-Aqua имеет вид:

$$\text{Chl} = 0.568 (R_{rs}(488)/R_{rs}(547)) - 2.39. \quad (6)$$

На рисунке 6 сравниваются среднемесячные пространственные распределения концентрации хлорофилла, рассчитанные по данным сканера цвета MODIS-Aqua с помощью старого (слева) и нового (справа) алгоритмов (в качестве примера взят июль 2008 г.).

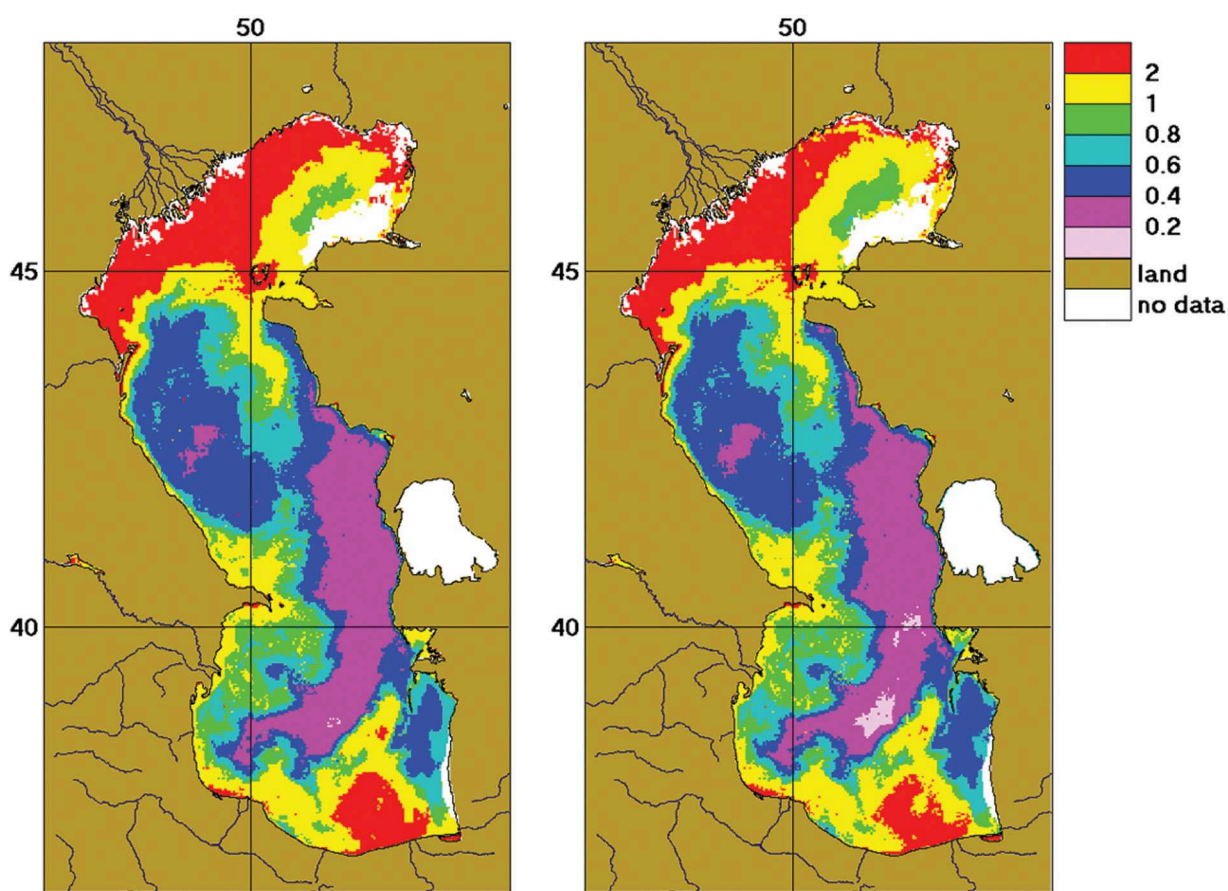


Рис. 6. Карты распределений концентраций хлорофилла, рассчитанных по данным спутникового сканера цвета MODIS-Aqua посредством ранее разработанного регионального алгоритма (слева) и модифицированного алгоритма (справа) за июль 2008 г.

Видно, что рассчитанные распределения практически совпадают. Такое совпадение – свидетельство устойчивости разработанного алгоритма: ведь старый и новый алгоритмы различаются и по используемым каналам, и по числу данных, использованных для их разработки (почти в полтора раза – 55 вместо 38). Как преимущество нового алгоритма можно отметить то, что он более простой (состоит из одного уравнения, вместо двух).

Модифицированный региональный алгоритм для расчета концентрации взвеси

Как и ранее, концентрация взвешенного вещества TSM (Total Suspended Matter) рассчитывалась через показатель рассеяния назад взвешенными частицами bbp (Burenkov et al., 2001). При выводе модифицированного алгоритма для концентрации взвешенного вещества в Каспийском море количество экспедиционных станций использовалось не 55, а 42, поскольку в 2006 г. прямые определения концентрации взвешенного вещества не проводились. Кроме того, несколько станций пришлось исключить, поскольку полученные данные были явно ошибочны.

Зависимость TSM *in situ* от показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} , рассчитанного по данным измерений плавающим спектрорадиометром, показана на рис.7. Линия регрессии, обозначенная на рисунке сплошной линией, соответствует уравнению регрессии

$$TSM = 67.1 * bbp + 0.554, \quad (7)$$

количество используемых данных $n=42$, $R^2 = 0.835$, ошибка уравнения регрессии равна 0.81 мг/л; коэффициент вариации составляет ~42%.

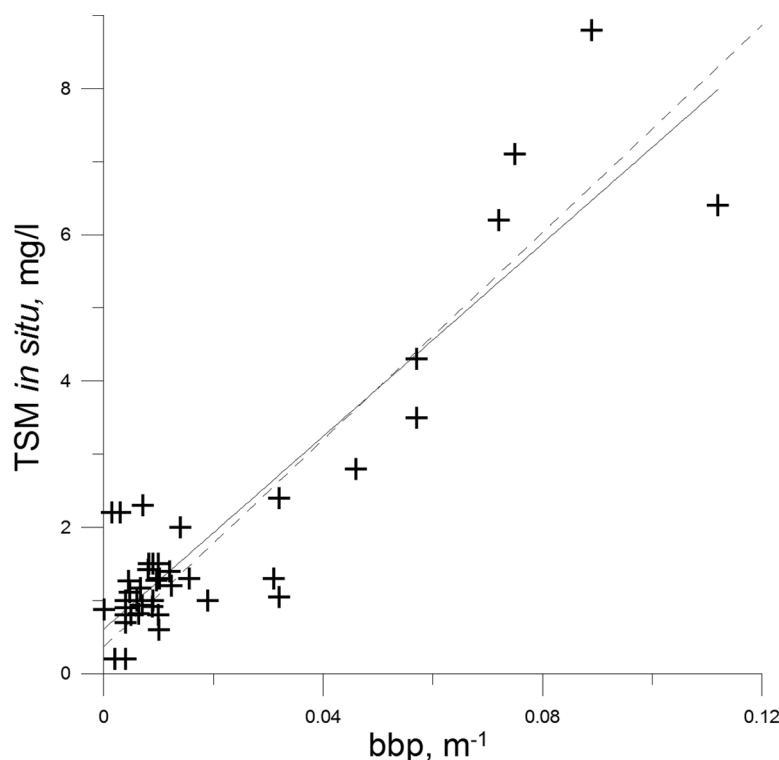


Рис. 7. Корреляция между рассеянием назад взвешенными частицами (b_{bp}) на длине волны 555 нм и измеренными значениями концентрации взвеси (TSM *in situ*) (сплошная линия – линия регрессии, построенная по модифицированному алгоритму; пунктирная линия – линия регрессии, построенная по ранее разработанному алгоритму)

На рисунке 7 пунктирной линией обозначена линия регрессии для ранее разработанного алгоритма. Как видно, обе линии регрессии близки друг к другу, хотя небольшие различия наблюдаются. При $b_{bp} = 0.1 \text{ м}^{-1}$ значения TSM для разных алгоритмов отличаются менее чем на 2.5%, при 0.05 м^{-1} они совпадают, при 0.01 м^{-1} различия наибольшие (примерно 14%). Но как раз в области малых значений возросло число данных для разработки алгоритма (с 21 до 42 пар данных), поэтому здесь новый алгоритм более надежен.

Заключение

Полученные результаты позволили оценить применимость ранее выведенных алгоритмов для новых данных натуральных измерений и вывести модифицированные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла и взвешенного вещества для летнего сезона в северной половине Каспийского моря.

Для верификации алгоритмов в другие сезоны и в южной половине Каспийского моря необходимы дополнительные натурные измерения.

Литература

1. *Burenkov V.I., Ershova S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Shevchenko V.P.* An estimate of the distribution of suspended matter in the Barents Sea waters on the basis of the SeaWiFS satellite ocean color scanner // *Oceanology*, 2001, 41 (5), 622-628 (translated from *Okeanologiya*, 2001, 41(5), 653-659).
2. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V. et al.* Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // *Deep-Sea Research II*, 2004, 51, 1063-1091.
3. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V.* Case Studies of Optical Remote Sensing in the Barents Sea, Black Sea, and Caspian Sea. In "Remote Sensing of the European Seas", V. Barale, M. Gade (Eds.), Springer, 2008, pp. 53-66.
4. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V., Bayanova E.A.* Monthly distributions of bio-optical characteristics in the Russian Seas from satellite ocean color data in the period 1998-2008 // *Proc. V International Conference Current problems in Optics of Natural Waters (ONW 2009)*, St. Petersburg, September 8-11, 2009, pp. 11-120.