

**Краткий отчет по гранту 23-27-00124 «Современные алгоритмы расчета концентрации взвешенного вещества и мутности в приустьевых зонах морей по оптическим спутниковым данным высокого пространственного разрешения: анализ и верификация».**

Руководитель гранта Назирова К.Р.

Задачей проекта является разработка методов дистанционной диагностики количественных характеристик речных плюмов, в первую очередь мутности вод в приустьевых зонах и концентрации взвешенного вещества на основе оптических спутниковых данных высокого пространственного разрешения. Верификация спутниковых алгоритмов базируется на использовании результатов синхронных подспутниковых измерений in-situ.

В 2023 году были выполнены следующие работы и получены основные результаты.

1. Проведен анализ стандартных спутниковых алгоритмов восстановления значений концентрации взвешенного вещества и мутности, рекомендованных ESA и NASA для сенсоров оптического диапазона спутников Sentinel-2 и Landsat-8/-9. Все стандартные алгоритмы определения концентрации взвешенного вещества и мутности воды требуют предварительного проведения атмосферной коррекции. С этой целью были рассмотрены некоторые программные комплексы атмосферной коррекции, которые включают в себя алгоритмы из программного комплекса ACOLITE и алгоритм C2RCC (Case 2 Regional Coast Color). В ходе проведенного исследования были рассмотрены следующие алгоритмы: Nechad 2009, Nechad2015, Dogliotti 2015 и C2RCC. Каждый из этих алгоритмов имеет ряд преимуществ. Преимуществом алгоритмов из ACOLITE является их высокая производительность и независимость от выбора спутникового аппарата. Сохранение высокой производительности при учете различных аэрозольных моделей, и при том, что отсутствует необходимость задания дополнительной информации об исследуемом регионе, делает эти алгоритмы предпочтительными при исследовании различных акваторий. C2RCC, как алгоритм атмосферной коррекции, включает в себя различные процессоры (C2-Nets), которые различаются диапазонами обучения нейронной сети. В ряде статей отмечается, что все процессоры C2 имели тенденцию недооценивать Rrs синих и зеленых полос. Тем не менее, C2RCC имеет высокую степень согласованности с данными подспутниковых измерений, полученными разными научными коллективами. Каждый из перечисленных алгоритмов имеет и свои недостатки. Общий главный недостаток, что они не являются универсальными. Каждый из этих алгоритмов дает наилучшие результаты в определенном диапазоне значений мутности. На основе проведенного анализа было решено, что для районов проведения наших in-situ измерений следует протестировать следующие спутниковые алгоритмы: Nechad-2009, -2015; Dogliotti, входящих в программный пакет ACOLITE, и C2RCC. Для проведения атмосферной коррекции следует отдать предпочтение методу "Dark Spectrum Fitting". Основная задача наших исследований была определить границы применимости различных алгоритмов для разных районов и для разных приборов.

2. Проведен анализ архива данных подспутниковых синхронных измерений в тестовых районах в период с 2015 по 2022 гг. с целью отбора материала для дополнительных верификационных расчетов согласно научному плану работ проекта. Всего из 14 различных подспутниковых экспериментов, проведенных членами научного коллектива в период 2015-2022 гг., были отобраны материалы из 7 серий подспутниковых синхронных измерений в тестовых регионах. Тестовыми районами являлись: район выноса р. Мзымта в Черном море, выноса рек Сулак и Терек в Каспии, и район выноса из Калининградского залива в Балтийском море.

3. В 2023 г. было проведено 2 серии натурных подспутниковых экспериментов в весенне-летний период, синхронно со спутниковой съемкой: с 15 апреля по 8 мая 2023 г. в районе выноса р. Мзымта и с 31 мая по 10 июня 2023 г. в районе выноса р. Терек и р.

Сулак.

4. На основе архивных и оперативных данных за 2023 г. была составлена репрезентативная выборка имеющихся в наличии у членов научного коллектива данных синхронных подспутниковых измерений поля мутности и концентрации взвешенного вещества. Для совместного анализа были выбраны данные за 2018-2023 гг. (кроме 2020 г., когда измерения не проводились) для приустьевой зоны р. Мзымта и за 2021-2023 гг. для приустьевых зон рек Сулак и Терек.

Всего было отобрано 25 серий квазисинхронных измерений в приустьевой зоне р. Мзымта. Для приустьевых зон рек Терек и Сулак было отобрано 8 серий квазисинхронных измерений.

5. На основе архивных и оперативных данных подспутниковых натуральных измерений и новых данных, полученных в 2023 г. выполнен сравнительный анализ разных типов данных о концентрации взвешенного вещества, измеренных разными оптическими датчиками, с результатами исследования проб морской воды. Проведенный анализ позволил оценить взаимосвязь оптических и гравиметрических единиц мутности. Для тестовых районов в Каспийском и Черном морях предложены формулы преобразования одних единиц измерения в другие, применимые для конкретных регионов в период весенне-летних паводков. Уточнены методики определения содержания взвешенного вещества в пробах воды, отобранных *in situ*, для сопоставления с результатами измерений с помощью датчиков мутности и количественными результатами, полученными на основе спутниковых данных.

6. Результаты проведенных расчетов концентрации взвешенного вещества и мутности с помощью различных спутниковых алгоритмов показали следующее.

- Для реки Мзымта, граница плюма которой существенно меняет свое положение даже в течение суток, необходимо использовать только спутниковые данные, синхронные с *in-situ* измерениями.

- Алгоритмы Nechad 2009, Nechad 2015 показали неплохие результаты для низкого диапазона мутности. Алгоритм Dogliotti занижает значения мутности до порога в 50 NTU, после которого, наоборот, значения мутности превосходят натурные измерения более чем на 10 NTU.

- Алгоритм Nechad 2015 подходит для расчёта мутности морской воды в применении к прибрежным водам исследуемого района Чёрного моря в диапазоне невысоких значений мутности (до 60 NTU).

- Для р. Терек, где мутность во время *in-situ* измерений постоянно была высокой, доходила до 600 NTU, однозначно надо применять алгоритм Dogliotti. Остальные алгоритмы дают неплохое соответствие только на дальних от устья станциях.

- Для р. Сулак выбор алгоритма зависит от замутненности вод. Но в большинстве случаев также следует использовать алгоритм Dogliotti.

- В случае сильно замутненных вод, как это было в начале июня 2023 г., когда селевые потоки, попавшие в р. Сулак, достигли Каспийского моря, и измеренная *in-situ* мутность превысила 1000 NTU, никакой алгоритм, включая алгоритм Dogliotti, не мог адекватно отразить ситуацию. Согласно расчетам по алгоритму Dogliotti, значения мутности были завышены в 3-4 раза.

- Для определения концентрации взвешенного вещества расчеты по алгоритмам Nechad 2009, Nechad 2015 и C2RCC позволили сделать следующий вывод: для совсем низких значений, до 15 мг/м<sup>3</sup>, наилучший результат показывает алгоритм C2RCC. Алгоритмы Nechad 2009, Nechad 2015 завысили оценку SPM в 1,5 раза в данном диапазоне значений. Для диапазона более 20–25 мг/м<sup>3</sup> данные Nechad 2015 хорошо согласовались с данными *in-situ* и результатами C2RCC. В случае, если наблюдаются значения мутности, превышающие порог в 50 NTU, алгоритм Nechad 2015 не работает.

Анализ построенных диаграмм рассеяния значений концентрации взвешенного вещества и мутности, полученных с помощью различных спутниковых алгоритмов, и измеренных in-situ, показал, что в подавляющем большинстве случаев наблюдается линейная зависимость с коэффициентом детерминации  $R^2$  от 0,7 до 0,98. Однако линейная зависимость характерна для значений мутности не более 150 NTU. При больших значениях наблюдается квадратичная зависимость, но с высоким коэффициентом детерминации от 0,8 до 0,98, как для мутности, так и для концентрации взвешенного вещества.

По результатам проведенных в 2023 в рамках гранта исследований были подготовлены и опубликованы 3 статьи в высокорейтинговом журнале, входящем в Scopus и RSCI. Сделано 2 доклада на международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» и один доклад на Всероссийской научной конференции молодых учёных «Комплексные исследования Мирового океана».

С материалами, посвященными данному проекту, можно ознакомиться на сайте [http://www.iki.rssi.ru/asp/dep\\_proj/proj\\_124.htm](http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_proj/proj_124.htm)