

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 2024 году были выполнены следующие работы и получены основные результаты.

1. Проведено 2 серии натурных подспутниковых эксперимента в весенне-летний период, синхронно со спутниковой съемкой: с 22 апреля по 1 мая 2024 г. в районе выноса р. Мзымта (Черное море) и с 28 июня по 04 июля 2024 г. в районе выноса р. Терек и р. Сулак (Каспийское море). Для первой серии в общей сложности выполнено 132 измерения на гидрологических станциях в течение пяти дней *in situ* измерений. Для приустьевых зон Каспийского моря было выполнено измерений на 80 станциях в течение трех дней для р. Сулак и двух дней для р. Терек. На основе совместного анализа подспутниковых данных в приустьевых районах р. Терек и р. Сулак за период с 2022 по 2024 года уточнена методика пересчета значений мутности в величины концентрации взвешенного вещества. Получено регрессионное соотношение между мутностью воды и концентрацией взвешенного вещества. Было показано, что во всём диапазоне полученных значений данные аппроксимируются линейной функцией $y = 0,88x$, проходящей через начало координат. Таким образом, получив значения концентрации взвешенного вещества путем отбора морских проб, можно произвести расчет мутности морской воды, используя линейную функцию для тех станций, где значения мутности не определялись прибором (в том числе в силу превышения возможного диапазона измеряемых величин).
2. Выполнен анализ безоблачных спутниковых данных, полученных с сенсоров MSI (Sentinel-2A/-2B), OLI/OLI-2 (Landsat-8/9) для исследуемых районов с последующим применением на них алгоритмов Nechad и Dogliotti, входящих в программные комплексы ACOLITE и C2RCC для определения поля мутности, а также алгоритм Nechad2015 для определения концентрации взвешенного вещества. Для первой серии измерений отсутствовали безоблачные спутниковые изображения, для второй серии получены синхронные спутниковые изображения, на которых однозначно определялся речной вынос. Для р. Мзымта использовано только одно изображение за 22 апреля 2024 г., на котором определяется речной вынос, и сопоставлено с результатами *in situ* измерениями за 24 апреля 2024 г.
3. Получены результаты сравнительного анализа значений мутности и концентрации взвешенного вещества, получаемых с одних и тех же алгоритмов, с одинаковыми входными параметрами для случаев синхронной съемки приборами MSI и OLI/OLI-2. Зафиксирована высокая корреляционная зависимость между результатами обработки изображений со спутников Sentinel-2 и Landsat-8/9. В качестве метрик качества применялись статистические оценки дисперсии ошибки MAD, средняя абсолютная величина относительной погрешности MARD и среднеквадратичное отклонение RMSD. По результатам расчета уровня мутности определена линейная зависимость, что говорит о согласованности получаемых данных с

разных спутниковых систем. Отмечено, что средние значения, полученные с OLI/OLI-2 несколько выше, чем значения MSI, что необходимо учитывать в дальнейших исследованиях.

4. Представлены примеры и обоснование наиболее подходящих входных параметров алгоритмов для расчета полей мутности воды и концентрации взвешенного вещества, адаптированных с учетом проведенных натурных измерений. Установлена эффективность применения входного параметра Dark Spectrum Fitting (DSF) для выполнения атмосферной коррекции спутниковых изображений перед входным параметром Exponential Extrapolation (EXP). Метод DSF учитывает модели аэрозолей, что важно для прибрежных вод, где происходит перемешивание континентальных и морских аэрозолей. Также данный метод подготовлен с учетом большого количества метеорологических данных и независим от степени замутненности вод, что позволяет его применять даже на сильнозамутненных водах. У алгоритма EXP прослеживаются явные недостатки его применимости для исследуемых районов. В частности, метод EXP ошибочно интерпретирует солнечный блик на изображении как частицы аэрозоля.
5. Выполнено обобщение результатов, полученных в ходе исполнения проекта. Выявлены отличительные особенности в применении расчетных алгоритмов для разных тестовых районов, разных гидрометеорологических и гидрологических условий.
 - a. Для р. Мзымта результаты применения алгоритмов Nechad и Dogliotti существенно отклоняются от *in situ* измерений, в частности, из-за ежедневно меняющихся гидрометеорологических условий. Однако выявлено, что алгоритм Nechad наиболее точен в расчете мутности для данного района в дни с незначительным ветром (0-2 м/с). В то же время алгоритм Dogliotti, независимо от метеорологических условий, показывает значительные расхождения с *in situ* измерениями: в диапазоне 0-40 NTU наблюдается занижение значений, а в диапазоне 40-100 NTU – завышение значений на 40-60 NTU.
 - b. Для приустьевой зоны р. Терек наблюдается обратная ситуация. Алгоритм Nechad не рекомендуется к применению из-за низкого порога насыщения (40 NTU). Примененный здесь алгоритм Dogliotti определяет значения мутности с ошибкой примерно в 1,5 раза (среднее абсолютное отклонение ~30). В то же время при высоких значениях мутности до 1500 NTU алгоритм Dogliotti демонстрирует практически линейную зависимость с данными *in situ*, несмотря на значительную погрешность. Результаты анализа в приустьевой зоне р. Терек за 2022–2024 годы показывают, что алгоритм Dogliotti является предпочтительным при высоких значениях мутности, несмотря на высокую погрешность. Коэффициент детерминации составляет 0,82, и в целом наблюдается линейная зависимость.
 - c. Р. Сулак характеризуется значительной изменчивостью речного плюма, где параметры мутности варьируются от 100 до 1000 NTU. На ранее исследуемых участках подобная изменчивость максимальных значений мутности не была зафиксирована. В дни измерений, когда в устье р. Сулак зафиксированы небольшие значения мутности, алгоритм Nechad достаточно хорошо коррелирует с подспутниковыми измерениями. Разброс значений вокруг линии тренда может свидетельствовать о влиянии различных внешних условий. В дни с высокой мутностью вблизи устья реки алгоритм Nechad, достигнув порога насыщения, не рассчитывает результаты, в то время как алгоритм Dogliotti показывает практически линейную зависимость с подспутниковыми *in situ* данными.