

XXII международная конференция  
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

Исследование динамики параметров качества воды в  
Обской губе на основе результатов обработки  
многоспектральных спутниковых данных (2013-2023)

Худяков Н.В., Кириллов В.В. , Рыбкина И.Д., Ковалевская Н.М  
Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

Обская губа, самый крупный залив Карского моря, расположен между полуостровами Ямал и Гыданский, протяжённость с юга от дельты Оби на север до своей морской границы 800 км. Учитывая значительные пространственные масштабы, общая площадь акватории 40800 км<sup>2</sup>.

Мониторинг качества эстуарных вод представляет значительную проблему из-за динамической природы эстуарных водоемов. Спутниковое дистанционное зондирование, использующее соответствующие данные и алгоритмы обработки, потенциально предлагает решения для этой проблемы



Целью исследования является применение разных методов оценки концентраций хлорофилла и взвешенного вещества, а также показателя поглощения желтым веществом (окрашенным растворенным органическим веществом) на основе глобальных многоспектральных данных. В работе использовались данные спутников со средним (Landsat-8/9, 30м) и высоким (Sentinel-2, 10м) пространственным разрешением.

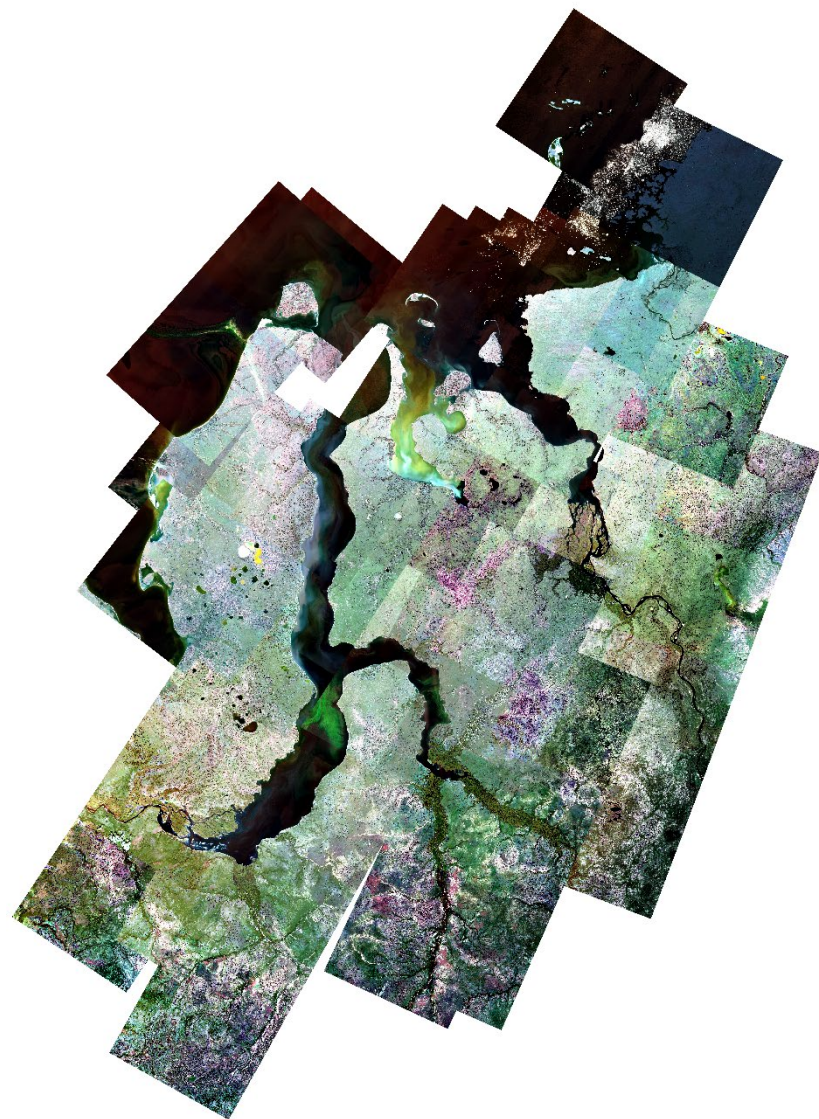


Рисунок 2. Мозаика изучаемой территории Sentinel-2

Для детального исследования были выбраны два ключевых участка Обской губы, которые характеризуются высокой антропогенной нагрузкой:

- 1) пос.Тамбей, порт Сабетта, терминал «Утренний».
- 2) пос.Мыс Каменный и пос.Новый Порт;

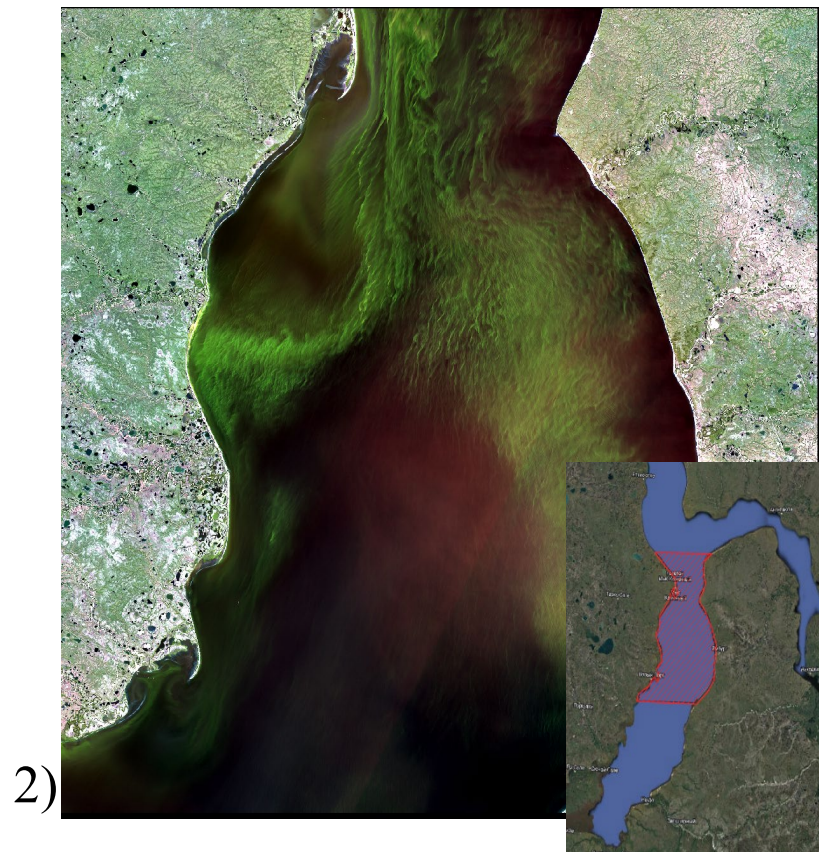
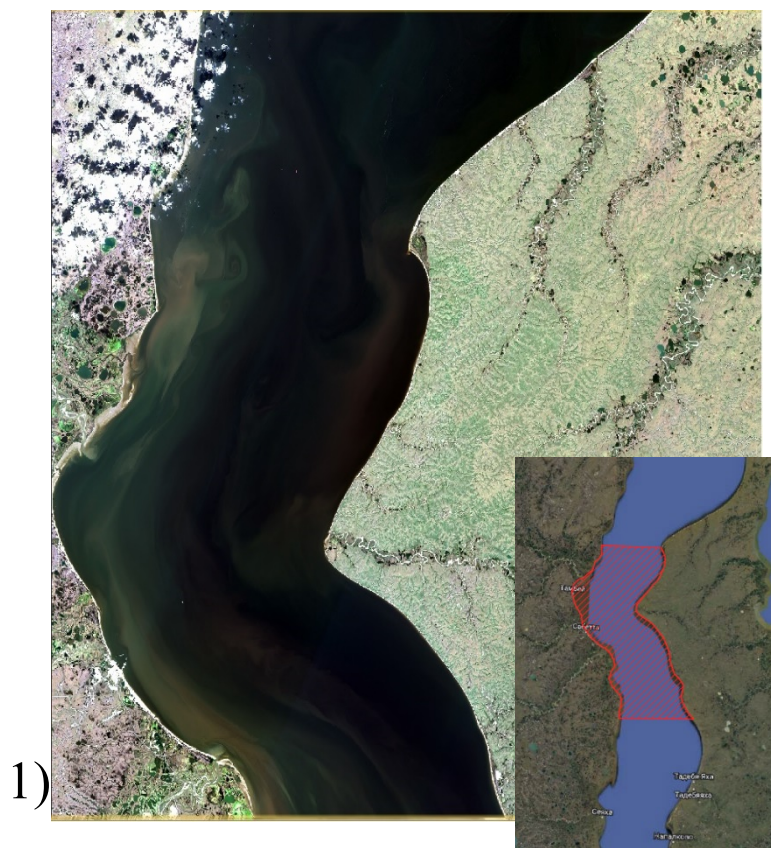


Рисунок 3. Примеры исследуемых участков сцены Sentinel-2

На данных участках строятся крупнейшие в России и мире объекты добычи, осуществляется круглогодичная транспортировка сжиженного газа и нефти, а также проводятся дноуглубительные работы.

Ресурсной базой проекта «Ямал-СПГ» компании «Новатэк» является Южно-Тамбейское месторождение, расположенное на северо-востоке полуострова Ямал. Здесь с момента запуска за 2016 года из мелкого залива извлекли более 17 млн кубометров грунта.

В 2020 году в порту Сабетта запустили новый проект дноуглубительных работ «Морской канал» (Судоходный канал в Обской губе). Общий объем изъятых грунта за 2021 году составил более 32 млн кубометров грунта. В рамках второго этапа в 2022 году планировалось извлечь ещё около 13 млн куб. м грунта.

С каждым годом запланированные объёмы поставок растут, в данный момент в рамках проекта «Северный морской путь» в 2024 году объём грузопотока составляет 80 млн. тонн.



Рисунок 4. Фото проводимых дноуглубительных работ [seanews.ru]

Для обработки спутниковых данных применялось программное обеспечение SNAP (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>), которое включает в себя водные процессоры C2RCC и C2X, основанные на нейросетевых технологиях.

Процессор C2RCC (Case-2 Regional CoastColour) использует обширную базу данных с моделируемыми коэффициентами отражения с умеренными значениями. Тогда как C2X (Case-2 eXtreme) обучен на коэффициентах с экстремальными показателями.

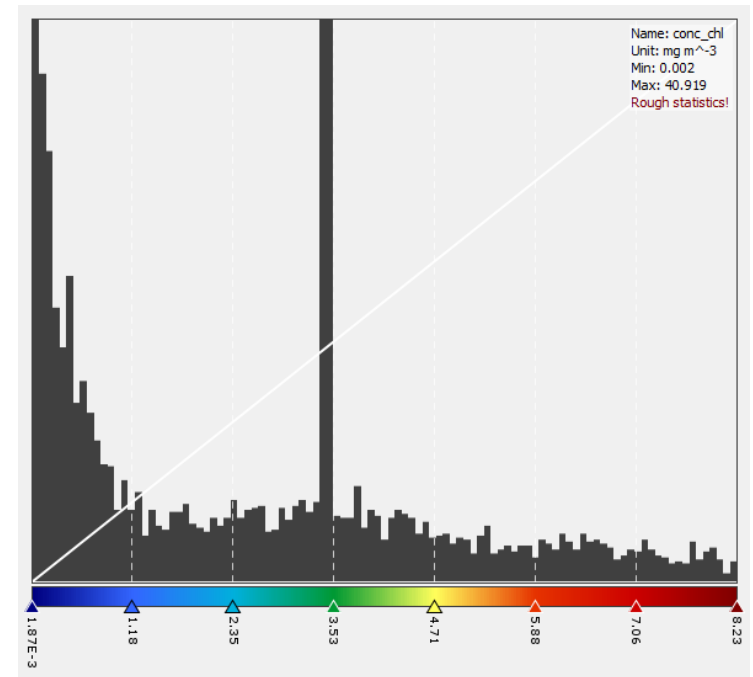
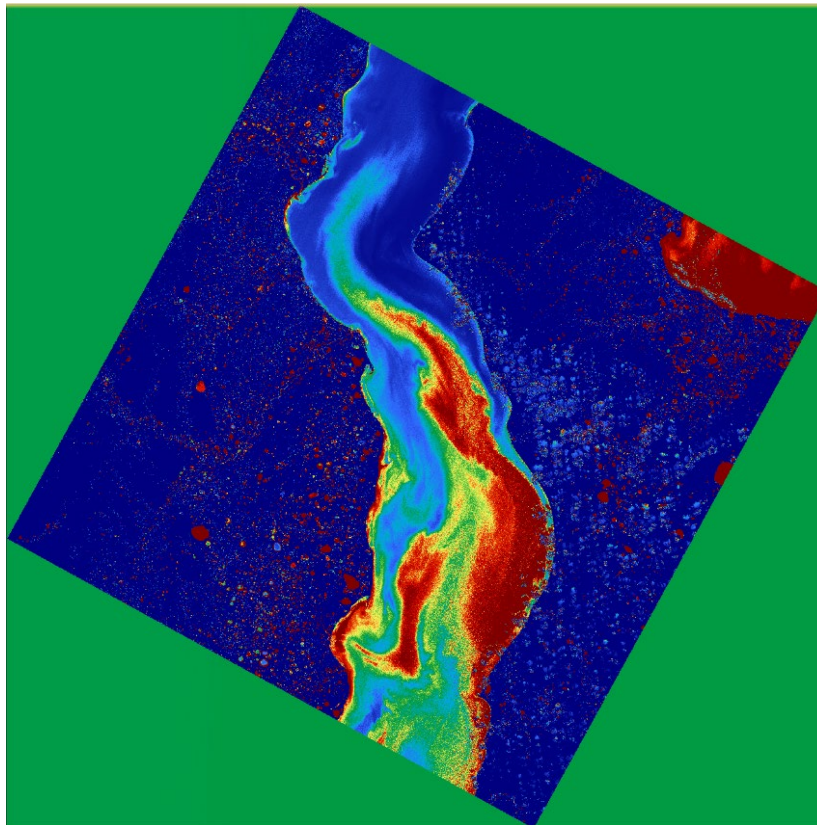

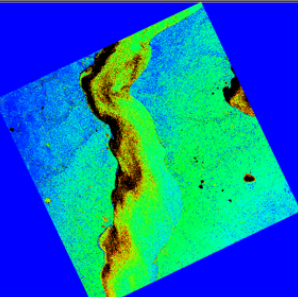
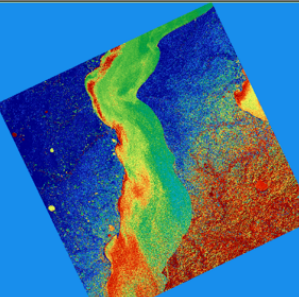
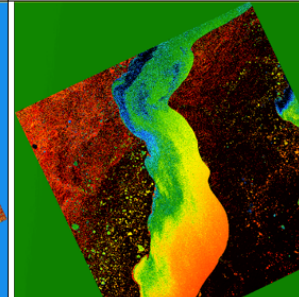
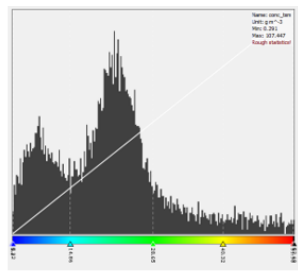
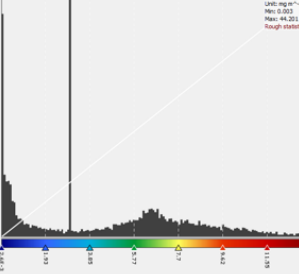
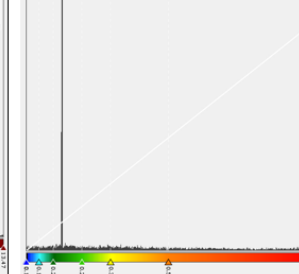


Рисунок 5. Пример результатов обработки, концентрации хлорофилла, полученные с помощью процессора C2RCC на основе данных LandSat-8

В результате проделанной работы была сформирована база данных спутниковых снимков за максимально доступный период Landsat-8/9 (2013-2023 г.) и Sentinel-2 (2015-2023 г.).

Что бы получить объективные данные, снимки должны быть сделаны в летний период, когда повышается температура воды, увеличивается интенсивность инсоляции и сходит лед.

| Дата           | Снимок без обработки  | C2RCC_tsm  | C2RCC_chl   | C2RCC_agelb  |
|----------------|---|--|---|--|
| 2023.<br>08.05 |  |   |   |   |
| 2023.<br>08.05 |   | Min: 5.104, Max: <b>52.194</b><br>Min: 0.291, Max: 107.447 (Rough)<br>g/m <sup>3</sup><br> | Min: 0.005, Max: <b>17.047</b><br>Min: 0.003, Max: 44.201 (Rough)<br>mg/m <sup>3</sup><br> | Min: 0.144, Max: <b>0.984</b><br>Min: 0.081, Max: 0.987 (rough)<br>m <sup>-1</sup><br> |

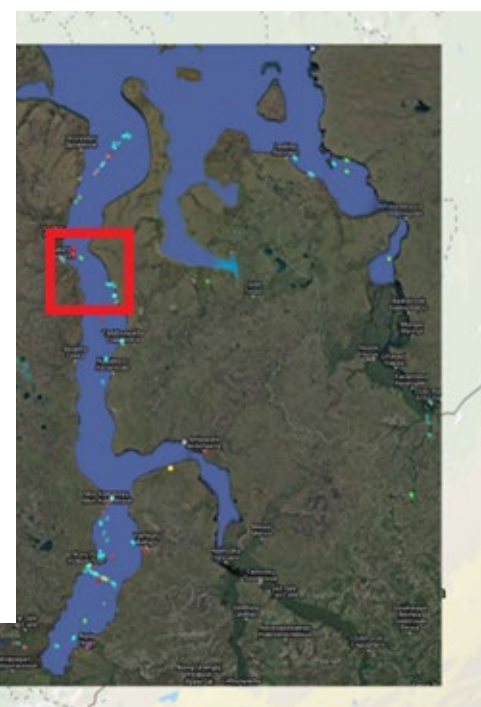
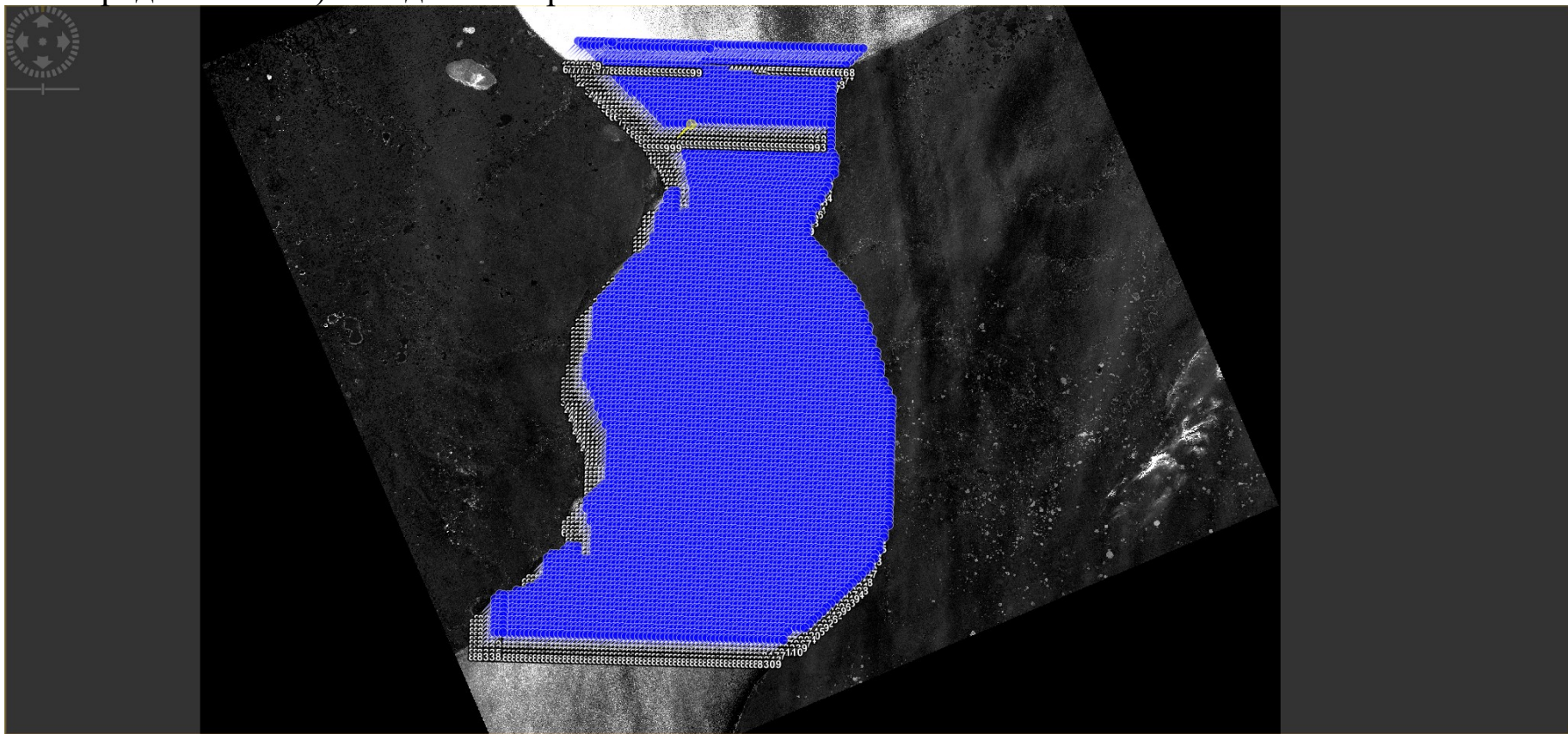


Рисунок 6. Пример из базы данных снимков, Landsat 8-9, район Тамбея, Сабетта и порта Утренний

Для анализа параметров качества воды на ключевых участках была построена сеть точек с шагом в 1 км для снимков Landsat-8/9 и 0,5 км для Sentinel-2. Следующим этапом сравнительной динамики изменений был, расчёт средних концентраций с учетом ошибок (коэффициентов неопределенности) в модельных расчетах.



Pin Manager X

| X        | Y        | Lon       | Lat       | Color | Label | conc_chi  | conc_tsm  | iop_adet   | iop_adg    | iop_ageib  | iop_apig   | iop_atot  | iop_bpart | iop_btbt  | iop_bwit   | kd489     | kd_r90max  | kdmin     | unc_adet    | unc_adg     | unc_ageib   | unc_apig    | unc_atot   | unc_bpart |
|----------|----------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|
| 2856.830 | 2418.214 | 72.958291 | 68.766248 |       | 1     | 20.409714 | 77.15306  | 0.96064395 | 1.4145548  | 0.45391083 | 0.9729575  | 2.3875122 | 5.6043215 | 27.382912 | 21.77859   | 2.888145  | 0.6071631  | 1.647004  | 0.098881185 | 0.20847754  | 0.13788567  | 0.13088532  | 0.34040302 | 2.4890301 |
| 3156.723 | 2426.238 | 73.180944 | 68.766624 |       | 10    | 12.245714 | 66.132576 | 1.1654556  | 1.4759233  | 0.31046778 | 0.59535205 | 2.0712755 | 9.274689  | 16.187132 | 3.156466   | 0.5579884 | 1.7921519  | 0.1069134 | 0.22832464  | 0.116496496 | 0.094009496 | 0.321081    | 3.327443   |           |
| 3922.223 | 2480.065 | 73.749809 | 68.757288 |       | 100   | 6.806522  | 58.304123 | 0.7780477  | 0.89662266 | 0.11857498 | 0.3384737  | 1.2350963 | 4.3606663 | 20.748981 | 16.388315  | 2.3787565 | 0.6817612  | 1.4667892 | 0.06557782  | 0.16161133  | 0.059069846 | 0.061773863 | 0.24543558 | 2.219899  |
| 3729.588 | 3075.959 | 73.624209 | 68.956102 |       | 1000  | 7.974187  | 60.859426 | 0.7883286  | 0.9749226  | 0.16259422 | 0.39415178 | 1.2688295 | 4.5683125 | 21.659333 | 17.09872   | 2.4262005 | 0.6879215  | 1.4032268 | 0.07722466  | 0.1629603   | 0.0545171   | 0.05741807  | 0.2543205  | 2.272832  |
| 3772.890 | 3076.204 | 73.648761 | 68.956062 |       | 1001  | 7.104181  | 56.871334 | 0.62264755 | 0.82732540 | 0.16470724 | 0.32689457 | 1.1800494 | 3.4131918 | 19.865013 | 15.45182   | 2.136057  | 0.7539748  | 1.3263043 | 0.05698993  | 0.142899    | 0.06880533  | 0.06010362  | 0.2271986  | 1.8819345 |
| 3806.211 | 3077.176 | 73.673314 | 68.956017 |       | 1002  | 17.531767 | 89.25559  | 1.430904   | 1.9973259  | 0.5664219  | 0.8405622  | 2.8379881 | 8.052673  | 32.378865 | 24.324192  | 3.5703804 | 0.5093959  | 1.9631096 | 0.14200151  | 0.23448537  | 0.1516418   | 0.12004446  | 0.33040163 | 2.950624  |
| 3839.532 | 3078.067 | 73.697866 | 68.955969 |       | 1003  | 14.332033 | 67.44346  | 0.9075836  | 1.1885533  | 0.2809668  | 0.6925796  | 1.8811328 | 5.6815066 | 24.285141 | 18.603634  | 2.7674296 | 0.61900157 | 1.6155049 | 0.086389825 | 0.1943892   | 0.10580253  | 0.10037106  | 0.3267063  | 2.5833068 |
| 3872.854 | 3078.959 | 73.722418 | 68.955917 |       | 1004  | 10.779928 | 62.920853 | 0.98090094 | 1.2073632  | 0.22646227 | 0.52666587 | 1.734029  | 6.7280197 | 23.292103 | 16.564083  | 2.8516383 | 0.59974724 | 1.6673691 | 0.08794445  | 0.2025129   | 0.094741665 | 0.08462791  | 0.307952   | 2.8569582 |
| 3906.175 | 3079.850 | 73.746970 | 68.95581  |       | 1005  | 11.665406 | 62.309708 | 0.9136191  | 1.2088188  | 0.29519966 | 0.5681991  | 1.7770178 | 5.579445  | 22.583658 | 17.004213  | 2.745196  | 0.62670225 | 1.595654  | 0.083653934 | 0.19425926  | 0.10732286  | 0.087785095 | 0.30466563 | 2.588594  |
| 3939.497 | 3080.742 | 73.771523 | 68.955802 |       | 1006  | 6.828361  | 43.506462 | 0.552693   | 0.8153393  | 0.26264635 | 0.3395179  | 1.1548573 | 3.334568  | 15.518764 | 12.1841955 | 1.8629037 | 0.88628286 | 1.1283079 | 0.048001524 | 0.14964886  | 0.08062426  | 0.05806403  | 0.23634396 | 1.7817    |
| 3972.818 | 3081.633 | 73.796075 | 68.955740 |       | 1007  | 15.508429 | 76.16148  | 1.3027387  | 1.7734874  | 0.47074875 | 0.7471573  | 2.5206447 | 8.323738  | 28.273626 | 19.949888  | 3.8667026 | 0.53522646 | 1.8683679 | 0.12570901  | 0.23124896  | 0.114710736 | 0.11106878  | 0.32999635 | 3.0625975 |
| 4006.139 | 3082.525 | 73.820626 | 68.955673 |       | 1008  | 8.945834  | 59.51534  | 0.80343306 | 0.9626063  | 0.19917328 | 0.44020537 | 1.4028118 | 4.7143064 | 12.297123 | 16.582817  | 2.511354  | 0.6625762  | 1.5092627 | 0.07038548  | 0.17250754  | 0.072770655 | 0.07240505  | 0.27862337 | 2.3353734 |
| 4039.461 | 3083.417 | 73.845178 | 68.955604 |       | 1009  | 5.422819  | 56.09499  | 0.6943535  | 0.7882745  | 0.09392101 | 0.27203262 | 1.0603071 | 3.242663  | 19.57504  | 16.250378  | 2.1237965 | 0.74151975 | 1.3485818 | 0.057559222 | 0.13478185  | 0.048443623 | 0.053492717 | 0.2027682  | 1.8326964 |
| 3955.345 | 2480.957 | 73.774539 | 68.757228 |       | 101   | 14.026276 | 68.967674 | 1.2793705  | 1.6099772  | 0.33060676 | 0.67836666 | 2.288344  | 10.549649 | 26.942728 | 16.395762  | 3.3678224 | 0.5333052  | 1.8750988 | 0.1202151   | 0.12299197  | 0.10386315  | 0.33823895  | 3.4798393  |           |

X 6442 Y 3686 Lat 68°19'39"N Lon 75°16'54"E Zoom 1:180.7 Level 2 Pixel Spacing: 30 m 30 m

Рисунок 7. Расчёт показателей в SNAP



На основании полученных результатов для спутниковой системы Landsat-8-9 процессор C2RCC имел более репрезентативные данные (рисунки 8-13).

| Год  | Chl-C2RCC, mg/m <sup>3</sup> |
|------|------------------------------|
| 2013 | 10,17                        |
| 2014 | 5,62                         |
| 2015 | 6,65                         |
| 2016 | 4,05                         |
| 2017 | 6,03                         |
| 2018 | 4,42                         |
| 2019 | 9,72                         |
| 2020 | 12,15                        |
| 2021 | 17,45                        |
| 2022 | 14,02                        |
| 2023 | 6,02                         |

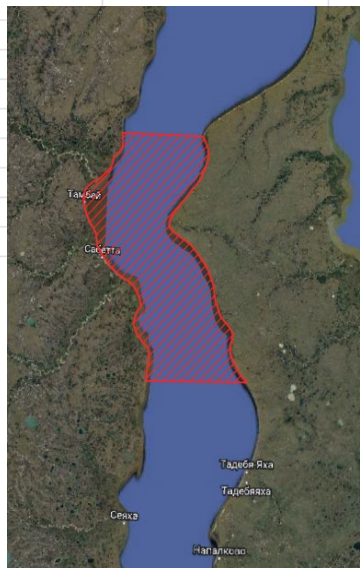
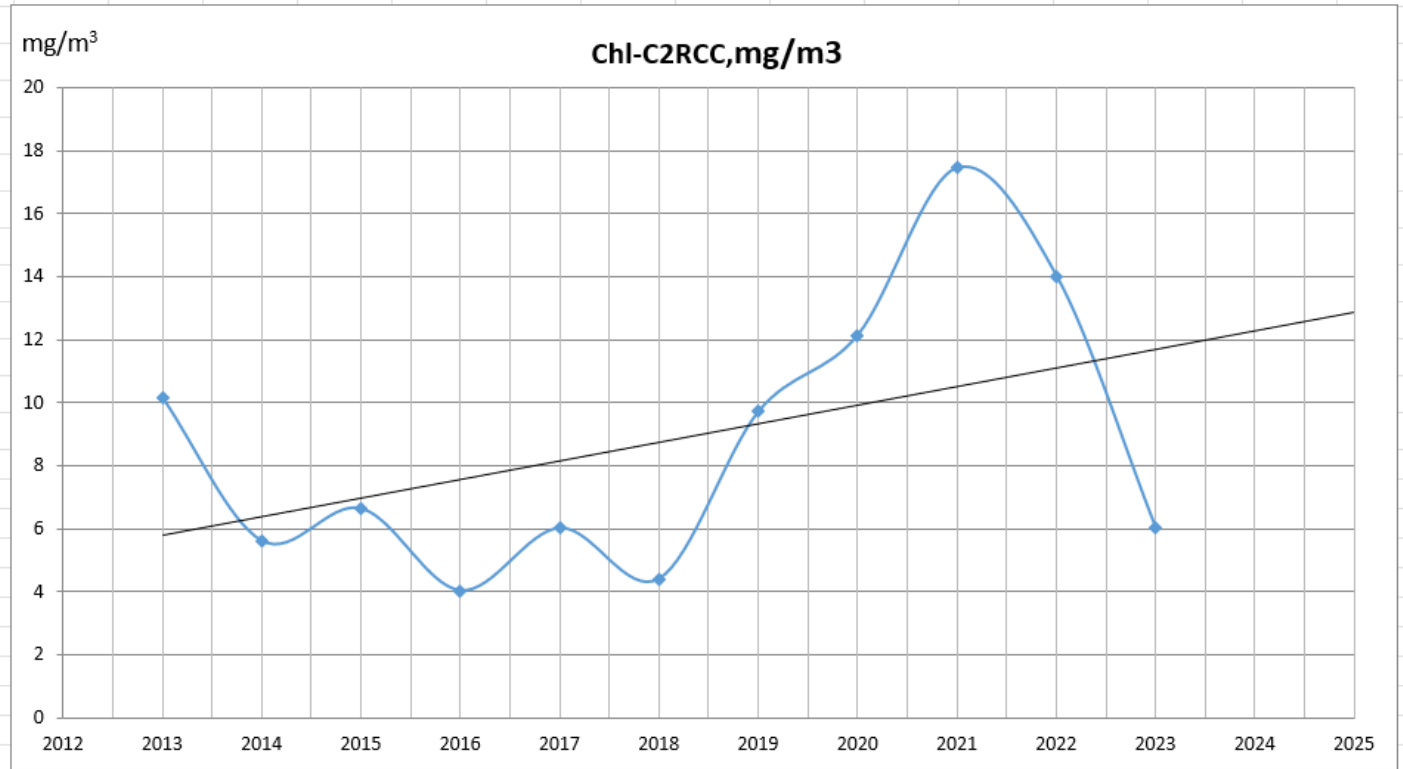


Рисунок 8. Рисунок 10. Результат анализа концентрация хлорофилла, процессор C2RCC, спутник Landsat-8, участок Тамбей-Сабетта-порт Утренний

| Год  | agelb-C2RCC, м <sup>⁻¹</sup> |
|------|------------------------------|
| 2013 | 0,39                         |
| 2014 | 0,41                         |
| 2015 | 0,42                         |
| 2016 | 0,26                         |
| 2017 | 0,28                         |
| 2018 | 0,27                         |
| 2019 | 0,68                         |
| 2020 | 0,57                         |
| 2021 | 0,76                         |
| 2022 | 0,63                         |
| 2023 | 0,50                         |

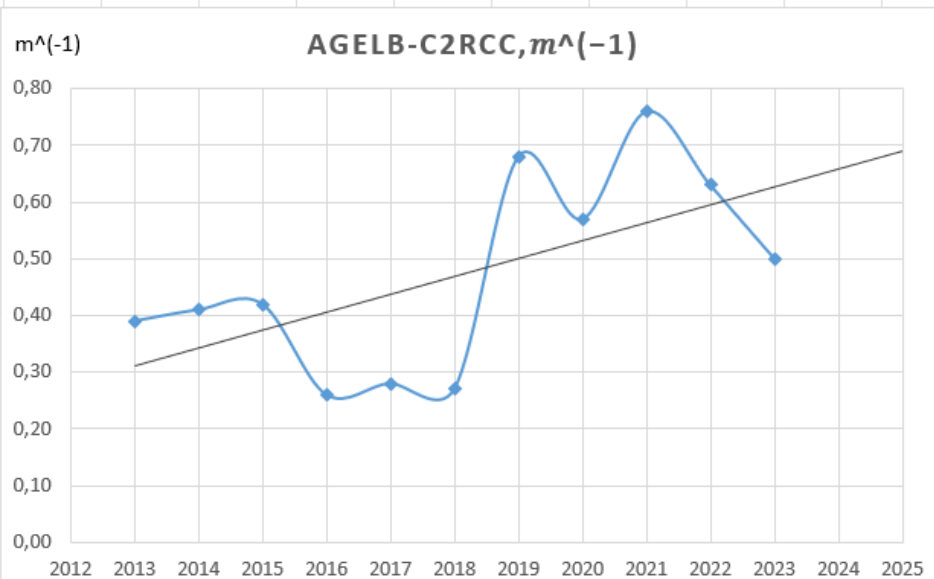


Рисунок 9. Результат анализа коэффициента поглощения желтым веществом, процессор C2RCC, спутник Landsat-8, участок Тамбей-Сабетта-порт Утренний

| Год  | TSM-C2RCC, г/м³ |
|------|-----------------|
| 2013 | 36,43           |
| 2014 | 24,59           |
| 2015 | 38,76           |
| 2016 | 15,58           |
| 2017 | 32,39           |
| 2018 | 28,13           |
| 2019 | 22,71           |
| 2020 | 33,35           |
| 2021 | 88,46           |
| 2022 | 58,56           |
| 2023 | 36,51           |

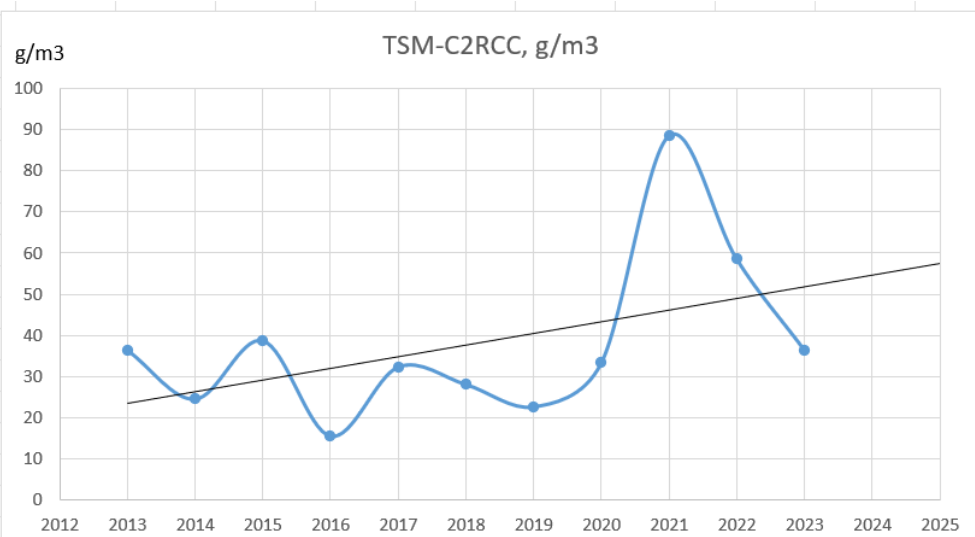


Рисунок 10. Результат анализа концентрации взвеси, процессор C2RCC, спутник Landsat-8, участок Тамбей-Сабетта-порт Утренний

| Год  | Chl-C2RCC, mg/m <sup>3</sup> |
|------|------------------------------|
| 2013 | 13,43                        |
| 2014 | 6,18                         |
| 2015 | 5,82                         |
| 2016 | 8,07                         |
| 2017 | 8,95                         |
| 2018 | 4,99                         |
| 2019 | 5,46                         |
| 2020 | 8,82                         |
| 2021 | 4,22                         |
| 2022 | 4,88                         |
| 2023 | 10,23                        |

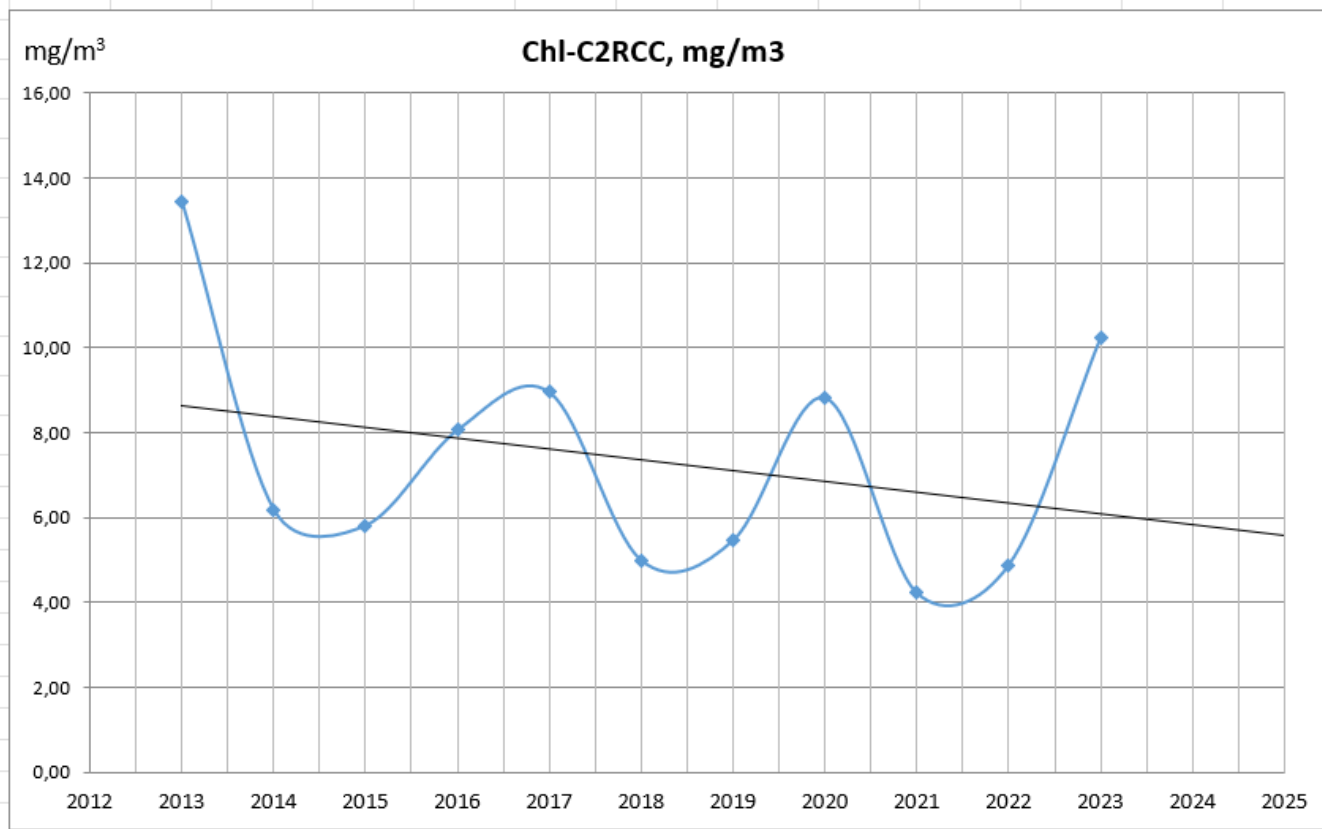


Рисунок 11. Результат анализа концентрация хлорофилла, процессор C2RCC, спутник Landsat-8, участок Каменный-Новый порт

| Год  | agelb-C2RCC, $m^{(-1)}$ |
|------|-------------------------|
| 2013 | 0,64                    |
| 2014 | 0,57                    |
| 2015 | 0,25                    |
| 2016 | 0,49                    |
| 2017 | 0,25                    |
| 2018 | 0,41                    |
| 2019 | 0,33                    |
| 2020 | 0,43                    |
| 2021 | 0,25                    |
| 2022 | 0,29                    |
| 2023 | 0,67                    |

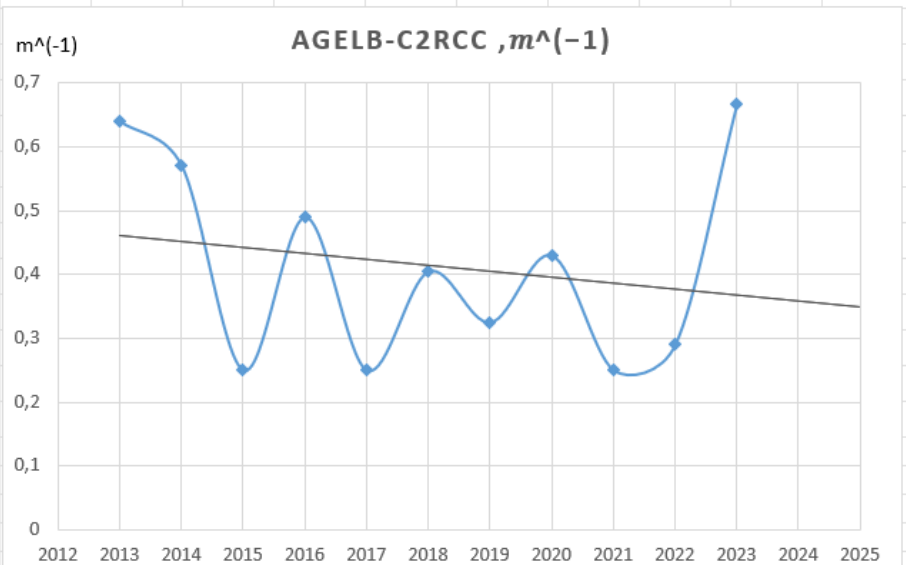
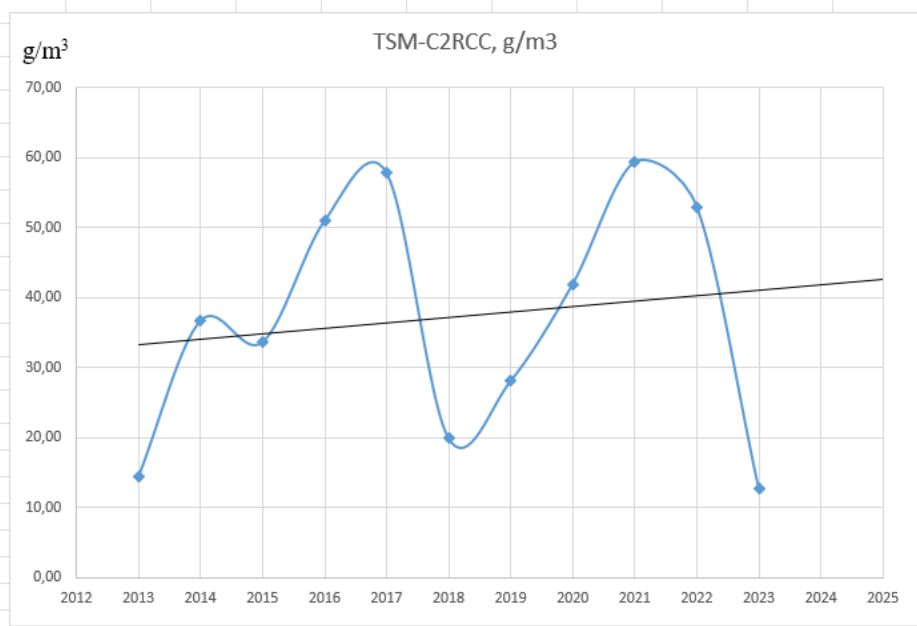


Рисунок 12.  
Коэффициент поглощения  
желтым веществом,  
процессор C2RCC,  
спутник Landsat-8, участок  
Каменный-Новый порт

| Год  | TSM-C2RCC, $g/m^3$ |
|------|--------------------|
| 2013 | 14,40              |
| 2014 | 36,69              |
| 2015 | 33,66              |
| 2016 | 50,95              |
| 2017 | 57,83              |
| 2018 | 19,98              |
| 2019 | 28,11              |
| 2020 | 41,94              |
| 2021 | 59,37              |
| 2022 | 52,98              |
| 2023 | 12,69              |

Рисунок 13.  
Концентрация  
взвеси, процессор  
C2RCC, спутник  
Landsat-8, участок  
Каменный-Новый  
порт



Для Sentinel-2 более корректные данные получились с использованием процессора C2X. На рисунках 14-16 представлены результаты.

| Год  | Chl-C2RCC, mg/m <sup>3</sup> |
|------|------------------------------|
| 2016 | 22.41                        |
| 2017 | 17.53                        |
| 2018 | 15.52                        |
| 2019 | 26.86                        |
| 2020 | 17.65                        |
| 2021 | 18.40                        |
| 2022 | 13.83                        |
| 2023 | 17.59                        |

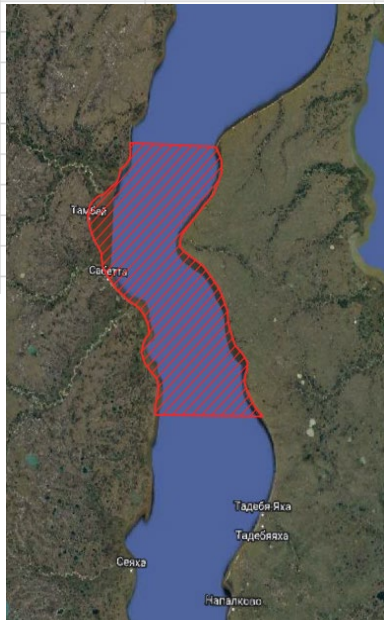
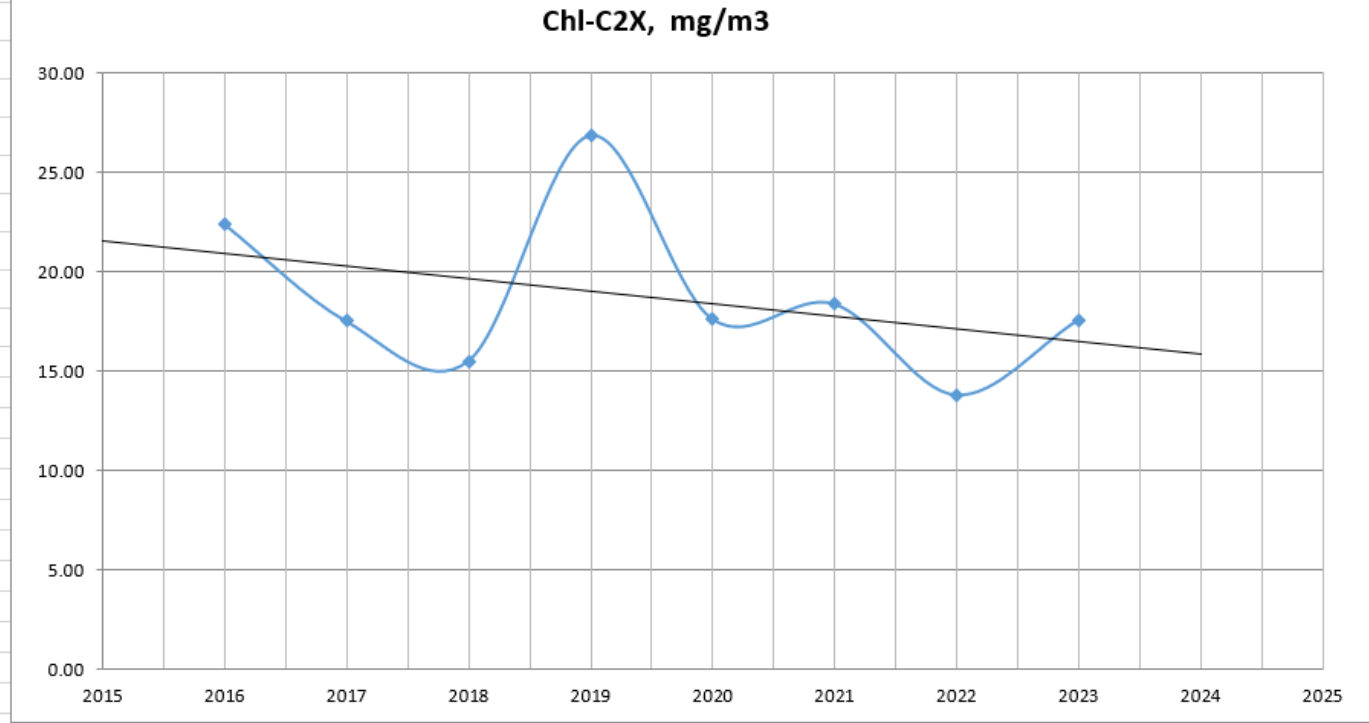


Рисунок 14. Результат анализа концентраций хлорофилла, процессор C2X, спутник Sentinel-2, участок Тамбей-Сабетта-порт Утренний

| Год  | agelb-C2X |
|------|-----------|
| 2016 | 6.72      |
| 2017 | 5.75      |
| 2018 | 5.75      |
| 2019 | 12.11     |
| 2020 | 6.72      |
| 2021 | 12.2      |
| 2022 | 5.86      |
| 2023 | 8.85      |

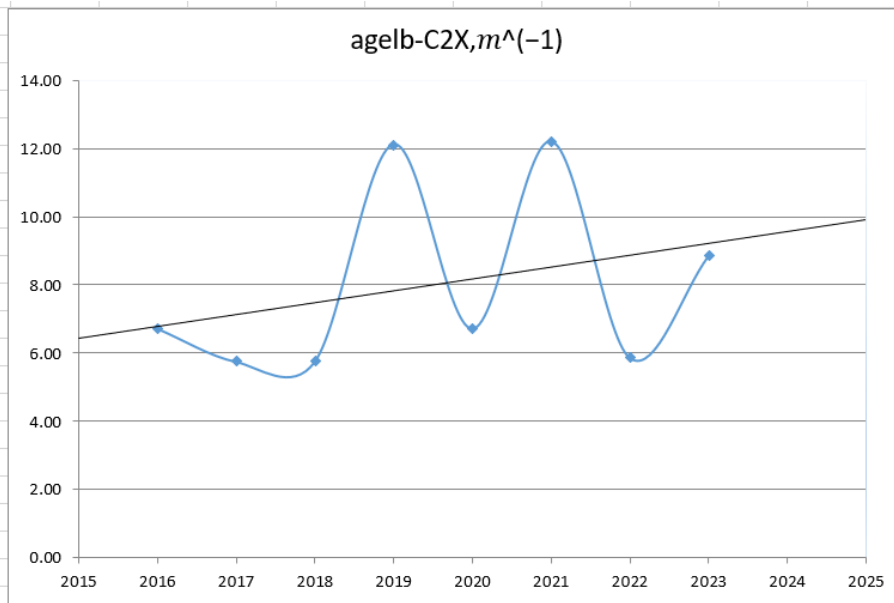


Рисунок 15.  
Коэффициент поглощения  
желтым веществом,  
процессор C2X, спутник  
Sentinel-2, участок Тамбей-  
Сабетта-порт Утренний

| Год  | TSM-C2X ,g/m3 |
|------|---------------|
| 2016 | 13.91         |
| 2017 | 16.85         |
| 2018 | 16.90         |
| 2019 | 18.18         |
| 2020 | 16.66         |
| 2021 | 21.34         |
| 2022 | 18.28         |
| 2023 | 16.88         |

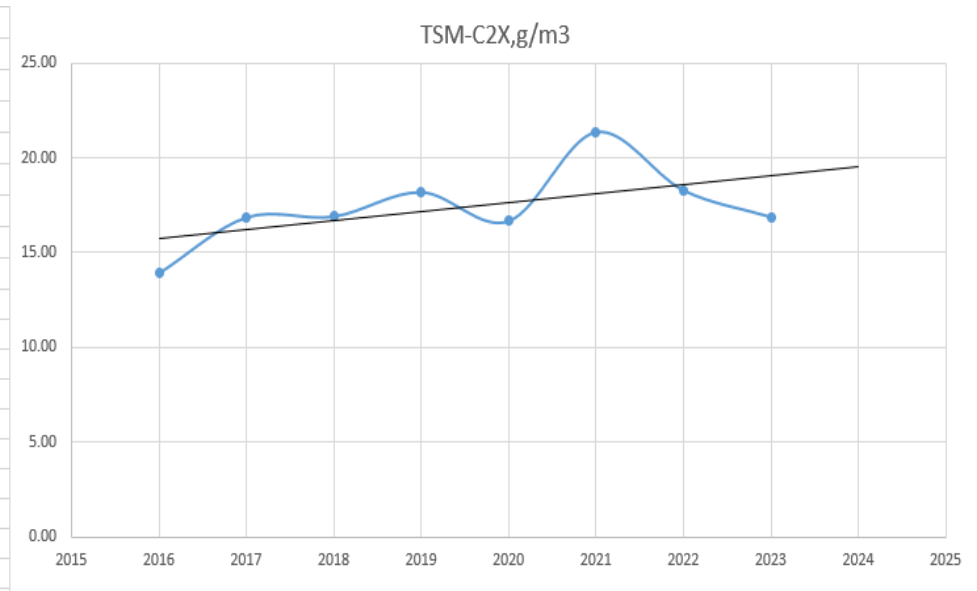



Рисунок 16. Результат  
анализа концентрации  
взвеси, процессор C2X,  
спутник Sentinel-2, участок  
Тамбей-Сабетта-порт  
Утренний



Полученные данные демонстрируют, что с начала периода активных дноуглубительных работ (2016 г.) существует зависимость между мутностью и концентрацией взвешенного вещества. Также возросли взаимосвязи между мутностью и яркостью (отражающей способностью) спектральных каналов Landsat 8-9 и Sentinel-2. Следующим шагом исследования будет анализ натурных данных для лучшего понимания поведения биооптических характеристик Обской губы.

Развиваемый подход может служить основой для классификации водных участков, подвергающихся различной антропогенной нагрузке, в том числе, для геоэкологической типизации акватории Обской губы в ходе производственного экологического контроля.



**Спасибо за внимание!**