

Санкт-Петербургский государственный университет

ЗАКОЛЮКИНА Анна Алексеевна

Выпускная квалификационная работа
Оценка однородности створов мониторинга реки Невы
по данным дистанционного зондирования земли

Уровень образования: *Магистратура*

Направление 05.04.06 «*Экология и природопользование*»

Основная образовательная программа *ВМ.5797*

*«Геоэкология: мониторинг, природопользование и экологическая
безопасность»*

Научный руководитель:

к. г. н., доцент, кафедра геоэкологии,
Третьяков Виктор Юрьевич

Рецензент:

к. г. н., доцент, заведующий
кафедрой, кафедра прикладной и
системной экологии,
ФГБОУ ВО «Российский
государственный
гидрометеорологический
университет»
Алексеев Денис Константинович

Санкт-Петербург

2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	7
1.1. Спутниковые снимки.....	7
1.2. Водные индексы.....	10
Глава 2. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОДНОРОДНОСТИ СТВОРОВ МОНИТОРИНГА РЕКИ НЕВЫ ПО ВОДНЫМ ИНДЕКСАМ	12
2.1. Скачивание спутниковых снимков	12
2.2. Обработка снимков в среде QGIS	13
2.3. Деление ряда	19
2.4. Оценка однородности рядов наблюдений в среде Mathcad.....	22
2.5. Результаты исследования	23
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	26
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	27
Приложение 1.....	30
Приложение 2.....	31

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одной из угроз для сохранения экологической стабильности Балтийского моря является его антропогенное эвтрофирование из-за избыточного поступления общего азота и фосфора с его водосборного бассейна (HELCOM, 2023). Эвтрофикация вод — это повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления в воде биогенных элементов (ГОСТ Р 59053-2020). Эвтрофирование негативно влияет на морские экосистемы, рыбопромысловые ресурсы и может представлять угрозу для здоровья людей. Международное значение имеет определение квот на объёмы поступления биогенных элементов от всех государств водосборного бассейна Балтийского моря. Нева — самая полноводная река бассейна Балтийского моря, а Санкт-Петербург — крупнейший мегаполис на его побережье.

Качество воды во всех створах мониторинга на реке Неве в 2021–2022 гг. оценивалось 3-м классом, преимущественно разрядом «а» («загрязненная» или «очень загрязненная») (Ежегодники «Качество поверхностных вод Российской Федерации», 2022 и 2023). Гидрохимические съемки водотоков в черте Санкт-Петербурга (рис. 1) проводятся в 15 пунктах (22 створа). В данной работе рассматривается гидроствор Новосаратовка 161(3), расположенный в черте Санкт-Петербурга на реке Неве, на 0,5 км ниже впадения реки Славянки.



Рисунок 1 – Схема расположения створов наблюдений за загрязненностью вод рек на территории Санкт-Петербурга

(Ежегодник «Качество поверхностных вод Российской Федерации», 2022)

В 2021 году в створе Новосаратовка (левый берег, дно) и на реке Славянка (граница Санкт-Петербурга и Ленинградской области (31,0 км выше устья), поверхность) было зафиксировано значение, квалифицируемое как высокое загрязнение (ВЗ). Показатель (концентрация в ПДК) загрязнения в обоих случаях — азот нитритный (10,7–15,2 ПДК). Среднегодовые концентрации азотов аммонийного, нитратного и нитритного были ниже ПДК во всех створах (Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2021 году, 2022).

Распределения средних многолетних значений концентраций валового фосфора по длине реки Невы, рассчитанные по данным наблюдений, имеют сложный характер и не всегда физически оправданы, а также сложную картину представляют погодичные изменения концентраций. Так средние многолетние значения концентраций валового фосфора в реке Неве увеличиваются от истока до створа Новосаратовка на 0,09 мг/л. Далее ниже створа происходит резкое уменьшение концентраций (Говор А. А., Шелутко В. А., Алексеев Д. К., 2020). Даже при оптимальных термических условиях

время, которое воды Невы затрачивают на преодоление пути от створа Новосаратовки до створа устья реки Охты, недостаточно для осуществления такого интенсивного потребления фосфора планктоном. Возможно, повышенное содержание биогенных элементов на створе 161 (3) связано с тем, что часть проб была отобрана в неразбавленной струе вод реки Славянки, характеризующейся в 2021 году как загрязненная, а в 2022 году — как очень загрязнённая (Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2022 году, 2023).

Оценка однородности рядов наблюдений поможет установить, отражают ли наблюдения реальную картину состояния реки в условиях антропогенной нагрузки; какой вклад имеет впадение вод реки Славянки в реку Неву. Выборку для расчёта однородности составили значения индексов мутности и цветности в точках створа за 2021–2023 год. Данные индексы подходят для оценки однородности, так как эвтрофикация способна приводить к цветению воды, являющемуся источником мутности и изменения оптических свойств водной среды.

Целью научно-исследовательской работы является оценка однородности створа мониторинга реки Невы по данным дистанционного зондирования Земли.

Для достижения заданной цели поставлены следующие **задачи**:

- осуществить сбор необходимых данных — скачивание спутниковых снимков за 2021–2023 года;
- рассчитать индекс мутности (NDTI) и нормализованный вегетационный индекс (индекс цветности (NDVI)) в точках буферной зоны створа;
- разделить ряды значений индексов по максимальному различию математических ожиданий;
- произвести статистический анализ однородности значений индексов вдоль створа мониторинга;

- при наличии существенных различий в значениях индексов на створе мониторинга определить границу между левым (впадение реки Славянки) и правым участками створа (участки вод с различной мутностью);

Во время работы были использованы: ГИС QGIS (версия 3.28.0); офисный пакет приложений Microsoft Office 2021; программный пакет Mathcad 15.

ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Водные процессы детально изучаются путем проведения полевых исследований. Полевые исследования обеспечивают высокую точность и надежность данных, но они могут быть ресурсоемкими, требуют значительных усилий и времени, а также могут быть ограничены доступностью к местам измерений. В случае труднодоступных территорий (например, Арктической зоны) данные дистанционного зондирования (ДЗЗ) могут обеспечивать более широкую территорию наблюдения, частоту измерений и меньшие затраты ресурсов по сравнению с полевыми исследованиями. Однако, ДДЗ могут иметь меньшую точность и надежность, если они не калибруются и не валидируются с помощью полевых данных. Поэтому для оценки водных систем необходим комплексный подход (Singh, Ankita & Vyas, 2022).

1.1. Спутниковые снимки

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) — это наблюдение поверхности Земли с помощью наземных, авиационных и космических средств, которые оснащены различными видами съемочной аппаратуры.

Спутниковые снимки содержат спектральную информацию об объекте. Отраженный свет поступает на модуль спутниковой системы и на основе данных коэффициента отражения можно определить тип поверхности.

В данной работе в качестве источника снимков выбран спутник Sentinel-2, так как в отличие от спутника Landsat-8, Sentinel-2 имеет 13 спектральных каналов, включая «крайний красный», более высокое пространственное (10 м) и временное разрешение (5 дней); тогда как Landsat-8 имеет только 11 каналов, временное разрешение 16 дней и сравнительно низкое пространственное разрешение (30 м); хотя его сенсор имеет также каналы в тепловом диапазоне (Совзонд). Также снимки Sentinel-2 уровня обработки Level-1C уже имеют радиометрическую коррекцию (TOA reflectances).

Sentinel-2 — семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства, созданное в рамках проекта глобального мониторинга окружающей среды и безопасности Copernicus. Спутники предназначены для мониторинга использования земель, растительности, лесных и водных ресурсов, также могут применяться при ликвидации последствий стихийных бедствий. Информационные продукты Sentinel-2, доступные пользователям, перечислены в таб. 1:

Таблица 1 – Пользовательский продукт Sentinel-2 (Sentinel Online)

Код	Описание	Пользователи
Уровень 1B	Излучение верхней части атмосферы в геометрии датчика	Опытные пользователи
Уровень 1C	Коэффициенты отражения верхней части атмосферы в картографической геометрии	Все пользователи
Уровень 2A	Коэффициенты отражения поверхности с поправкой на атмосферу в картографической геометрии	

Инструмент мультиспектральной съемки MSI Sentinel-2 измеряет отраженное электромагнитное излучение в 13 спектральных диапазонах от VNIR до SWIR (таб. 2).

Таблица 2 – Характеристики спектральных диапазонов MSI Sentinel-2

Номер диапазона	S2A		S2B		Пространственное разрешение (м)
	Центральная длина волны (нм)	Пропускная способность (нм)	Центральная длина волны (нм)	Пропускная способность (нм)	
1	442.7	20	442.3	20	60
2	492.7	65	492.3	65	10
3	559.8	35	558.9	35	10
4	664.6	30	664.9	31	10
5	704.1	14	703.8	15	20
6	740.5	14	739.1	13	20
7	782.8	19	779.7	19	20
8	832.8	105	832.9	104	10
8a	864.7	21	864.0	21	20
9	945.1	19	943.2	20	60
10	1373.5	29	1376.9	29	60
11	1613.7	90	1610.4	94	20
12	2202.4	174	2185.7	184	20

Спутники Sentinel-2 используются для мониторинга качества внутренних и прибрежных вод, а также для управления сельскохозяйственными культурами и лесами.

Sentinel-2 имеет инструмент мультиспектральной съемки (MSI), который получает данные в каналах спектра от видимого и ближнего инфракрасного до коротковолнового инфракрасного в 13 диапазонах (Sentinel Online):

- три видимых диапазона с пространственным разрешением 10 м;
- один видимый диапазон с разрешением 60 м;
- три NIR (ближний инфракрасный диапазон) с разрешением 20 м;

- шесть SWIR (коротковолновый инфракрасный диапазон) с разрешением 60 м.

VNIR (Visible and Near Infrared) — это спектральный диапазон, который включает в себя видимый и ближний инфракрасный диапазоны длин волн от 400 до 1000 нм. Спектральный диапазон SWIR (Short Wave Infrared) следует за диапазоном VNIR и охватывает короткие инфракрасные длины волн от 1000 до 2500 нм (Sentinel Online).

1.2. Водные индексы

Спектральные данные позволяют анализировать территорию, сравнивая коэффициенты отражения природных объектов, и оценивать их состояние (В. И. Акковецкий, 1984). Для описания водного объекта в данном исследовании используются основные индексы, которые в полной мере способны отобразить ситуацию по состоянию воды в реке: индекс мутности NDTI и индекс цветности.

Нормализованный разностный индекс мутности (NDTI) является показателем мутности воды, характеризует уменьшение прозрачности воды в связи с наличием примесей, взвесей, а также развитием планктона в водном объекте. Мутность может быть вызвана стоком земель, загрязнением, эрозии береговой линии (В. А. Морозова, 2019). NDTI выводит значения между $-1,0$ и $1,0$, чем выше значение данного индекса, тем более высокая мутность воды в водоеме. Индекс рассчитывается по формуле:

$$NDTI = (RED - GREEN) / (RED + GREEN)$$

где *RED* — отражение в красной области спектра; *GREEN* — отражение в зеленой области спектра.

Данный индекс также используется для количественной оценки CRC — процентного покрытия поверхности растительными остатками (Sharma, Vivek & Irmak, 2016).

Характерным признаком растительности является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в

отражении излучения разных длин волн. Расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух, не зависящих от прочих факторов, участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра RED (620–750 нм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону NIR (750–1300 нм) — максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. То есть высокая фотосинтетическая активность, связанная, как правило, с большой прикорневой фитомассой растительности, ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной. В результате математическая разница или частное от деления этих показателей позволяет четко отделять растительность от прочих природных объектов (С. Jordan, 1969).

Наиболее классическим вариантом вегетативного индекса на сегодняшний момент является нормализованный вегетационный индекс (NDVI), рассчитываемый по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

где *RED* — отражение в красной области спектра; *NIR* — отражение в ближней ИК области спектра.

Индекс может принимать значения от -1 , до $+1$, причём любые значения ниже нуля не имеют логического объяснения как проявление активности фотосинтезирующих растений, и фактически могут игнорироваться в исследованиях растительности — так как не несут смысловой нагрузки (Жолобов Д. А., 2015).

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОДНОРОДНОСТИ СТВОРОВ МОНИТОРИНГА РЕКИ НЕВЫ ПО ВОДНЫМ ИНДЕКСАМ

2.1. Скачивание спутниковых снимков

Спутниковые снимки были взяты с официального сайта сервиса EarthExplorer USGS (Служба геологической съёмки США), который работает через картографический сервис Google Maps.

Были заданы критерии поиска, такие как: диапазон дат с 01.01.2021 по 31.12.2022; выделен полигон, полностью включающий в себя реку Неву; источник набора данных — семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства Sentinel-2; процент данных, скрытых облачным покровом не более 20% (рис. 2).

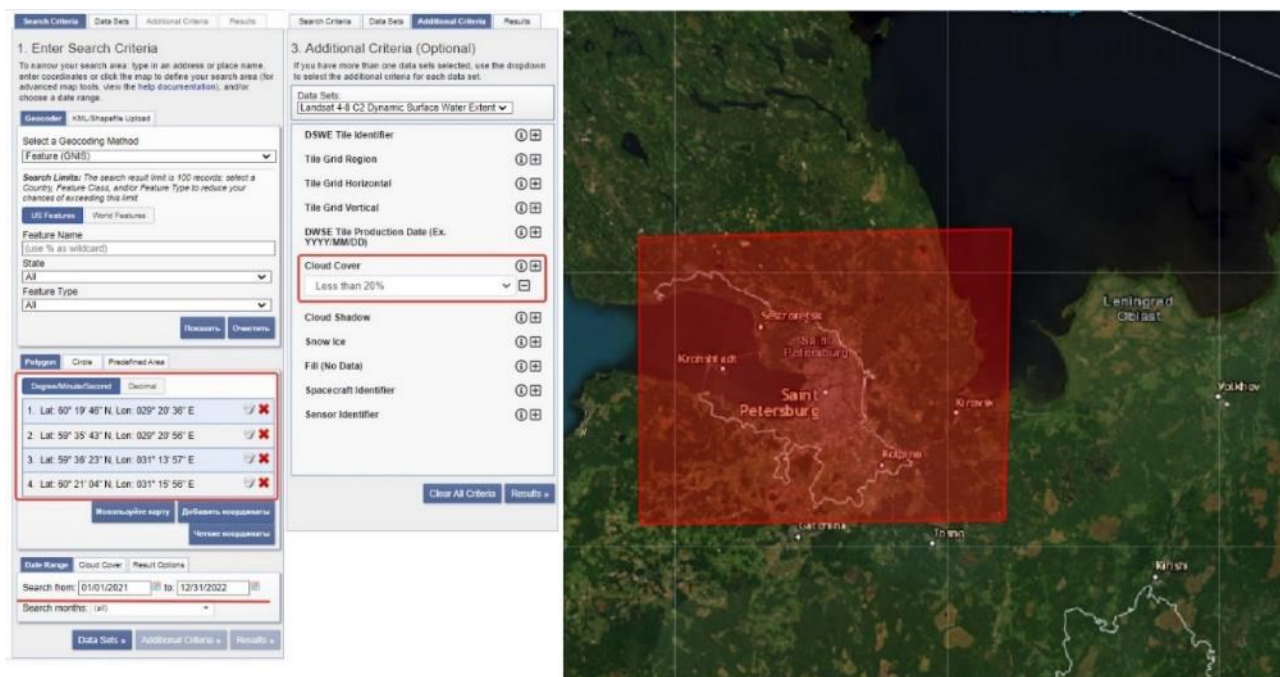


Рисунок 2 – Заданные критерии поиска при скачивании спутниковых снимков

Здесь и далее будет для примера использоваться данные за 30.09.2022. После скачивания архива с выбранными снимками, найдём нужные нам данные формата jp2 в папке: S2B_MSIL1C_20220930T092549_N0400_R136_T35VPG_20220829T101406.S AFE \ GRANULE \ L1C_T35VPG_A028619_20220829T092905 \ IMG_DATA.

В нашем случае, каждый снимок представлен тремя одноканальными растровыми изображениями в формате TIFF (каналы B03 (Red, красный), B04 (Green, зелёный), B08 (NIR, ближний инфракрасный)) — рис. 3.

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
<input type="checkbox"/> 2021-04-11-00_2021-04-11-23_59_Sentinel-2_L1C_B03_(Raw).tiff	11.11.2023 18:01	Файл "TIFF"	5 681 КБ
<input type="checkbox"/> 2021-04-11-00_2021-04-11-23_59_Sentinel-2_L1C_B04_(Raw).tiff	11.11.2023 18:01	Файл "TIFF"	5 845 КБ
<input type="checkbox"/> 2021-04-11-00_2021-04-11-23_59_Sentinel-2_L1C_B08_(Raw).tiff	11.11.2023 18:01	Файл "TIFF"	6 155 КБ

Рисунок 3 – Растровые изображения снимка за 11 апреля 2021 года

Все использованные в работе спутниковые снимки перечислены в таблице 3.

Таблица 3 – Список скачанных снимков

2021		2022		2023					
№ п/п	Дата	№ п/п	Дата	№ п/п	Дата				
1	11.04.2021	1	21.04.2022						
2	18.04.2021								
3	11.05.2021	2	03.05.2022	1	08.05.2023				
		3	21.05.2022	2	28.05.2023				
4	07.06.2021	4	07.06.2022	3	07.06.2023				
5	17.06.2021	5	27.06.2022	4	12.06.2023				
6	30.06.2021	6	30.06.2022	5	17.06.2023				
7	05.07.2021	7	22.07.2022						
8	07.07.2021								
9	15.07.2021								
10	17.07.2021								
11	27.07.2021								
		8	14.08.2022	6	31.08.2023				
		9	16.08.2022						
		10	19.08.2022						
				11	10.09.2022	7	10.09.2023		
								8	23.09.2023
								9	10.10.2023
		12	25.10.2022						
		13	30.10.2022						
Итого: 33 снимка									

Каналы B03, B04 используются при расчёте индекса мутности, каналы B04 и B08 — при расчёте вегетационного индекса. Все снимки уровня 1С.

2.2. Обработка снимков в среде QGIS

Открываем в программе QGIS проект IMG_UTM_35N, содержащий шейп-файлы со створом Новосаратовка реки Невы, его буферной зоной.

Добавляем в проект растровые слои T35VPG_20220630T093039_V03.jp2 (зелёный канал) и T35VPG_20220630T0930_V04.jp2 (красный канал) — рис. 4:

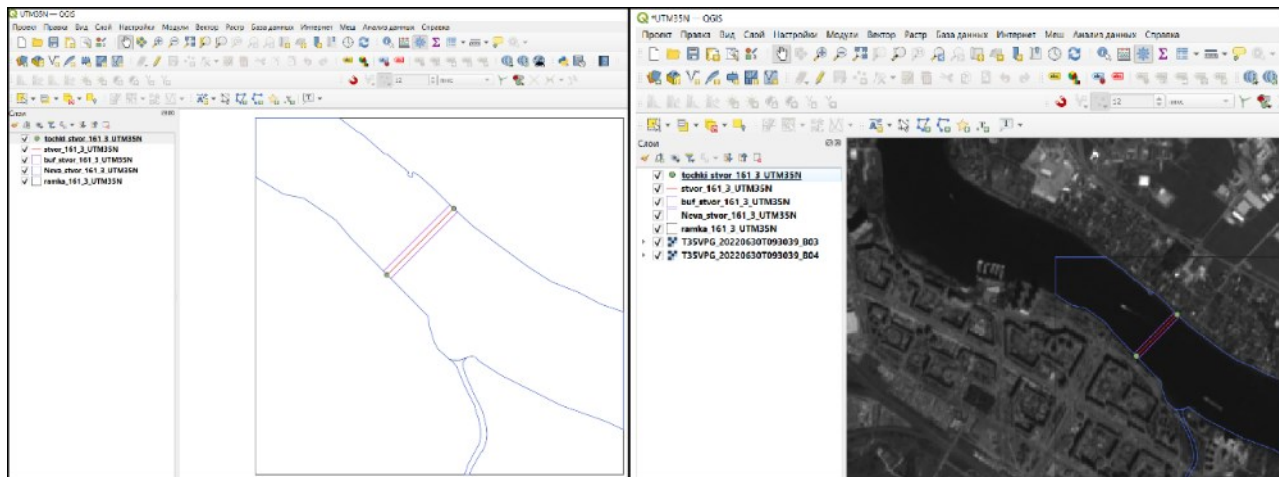


Рисунок 4 – Проект IMG_UTM_35N, растровые слои

Корректируем буферную зону створа: избавляемся от прибрежных мелководных участков. Данное изменение было совершено во избежание попадания буферной зоны створа на отмель. Границы отмели определялись в соответствии с картой глубин реки Невы (рис. 5).

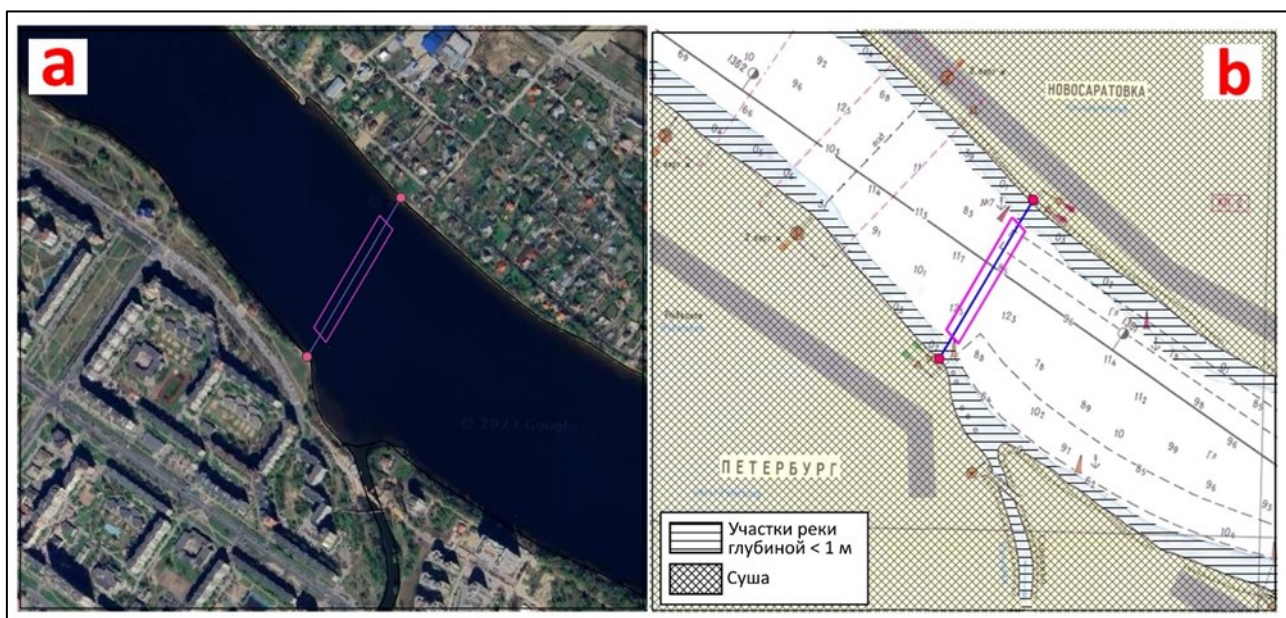


Рисунок 5 – Расположение скорректированной буферной зоны створа: спутниковый снимок (а), карта глубин р. Невы (б)

Открываем редактор моделей. Создаём 2 растровых слоя В03 и В04 для каждого из снимков и один векторный слой-маску с типом геометрии *Полигон*.

Создаём одноимённый алгоритм обрезания каждого растра по маске. Исходные слои берутся со входа модели; выбирается система координат проекта. При запуске модели в качестве растровых слоёв выбираем загруженные снимки; векторный слой (маска) — буфер створа. На выходе получаем два обрезанных по створу растровых слоя (рис. 6).

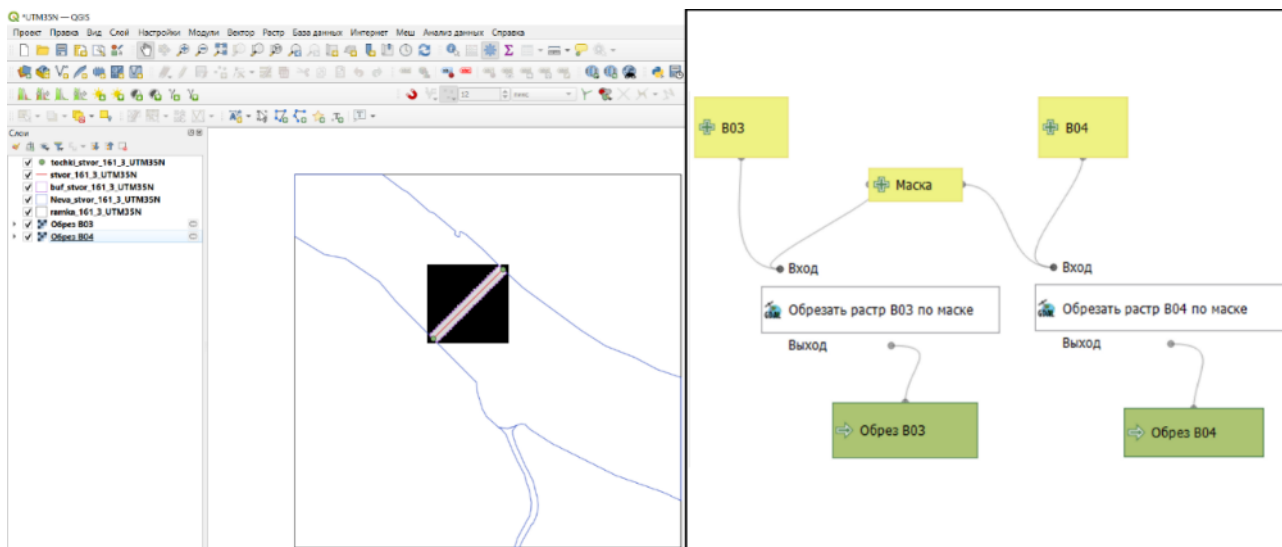


Рисунок 6 – Модель обрезки растра

Создаём новую модель. Аналогично добавляем 2 растровых слоя B03 и B04. Для расчёта индекса мутности по формуле $NDTI = (RED-GREEN) / (RED+GREEN)$ используем алгоритм *Raster calculator*: опорными выбираем слои B03, B04; вводим выражение $(\"B04@1\"-\"B03@1\")/(\"B04@1\"+\"B03@1\")$; исходным размером устанавливаем слой буфера; используем систему координат проекта. Применяем алгоритм *Пиксели в точки*. Растровый слой берём с выхода алгоритма *Raster calculator*. При запуске модели в качестве растровых слоёв выбираем полученные ранее обрезы исходных снимков (рис. 7).

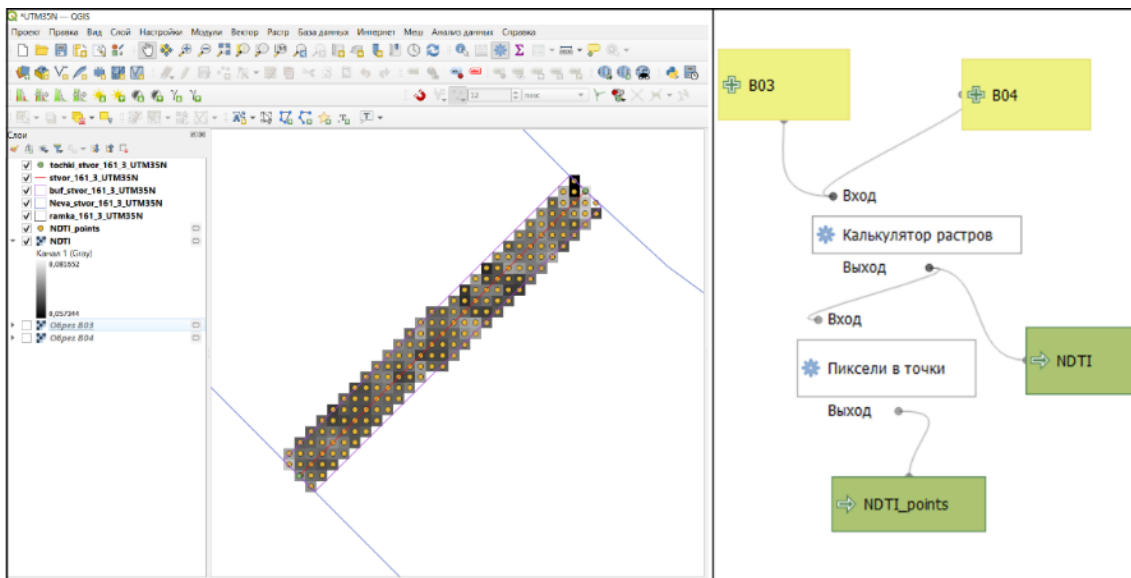


Рисунок 7 – Модель расчёта индекса NDTI

Создаём векторный слой с типом геометрии *Точка*. Для получения координат точек используем алгоритм *Калькулятор полей*. Исходным слоем выбираем только что созданный векторный слой. Задаём размер и точность поля результата (здесь и далее: 12 и 2 см соответственно). Вводим формулу $\$x$. Аналогично находим координаты y , только исходный слой берём с выхода алгоритма получения координаты x , а формулу заменяем на $\$y$. Получаем координаты, посмотреть которые можно в таблице атрибутов (рис. 8).

The screenshot shows the QGIS interface with the attribute table for the 'NDTI_points_coord_xy' layer. The table contains 15 rows of data, each representing a point with its calculated NDTI value and its x and y coordinates.

VALUE	x	y
0.057344373	697248,69	6638891,43
0.07459657	697238,79	6638881,57
0.057419356	697248,69	6638881,57
0.078806907	697258,59	6638881,57
0.066807315	697228,90	6638871,71
0.074844077	697238,79	6638871,71
0.066031314	697248,69	6638871,71
0.075916231	697258,59	6638871,71
0.081651658	697268,48	6638871,71
0.071402945	697219,00	6638861,86
0.067567565	697228,90	6638861,86
0.060415456	697238,79	6638861,86
0.071379073	697248,69	6638861,86
0.076559864	697258,59	6638861,86
0.064065039	697268,48	6638861,86

Рисунок 8 – Определение координат

Выполняем перенос координат. Используя *Калькулятор полей* рассчитываем значение $x\theta$: исходный слой берём с выхода алгоритма

получения координаты y ; вводим формулу " x "-697000.58, где число — значение координаты x первой точки створа. Аналогично рассчитываем значение y_0 , только исходный слой берём с выхода алгоритма расчёта x_0 , а формулу заменяем на " y "-6638624.638, где число — значение координаты y первой точки створа (рис. 9).

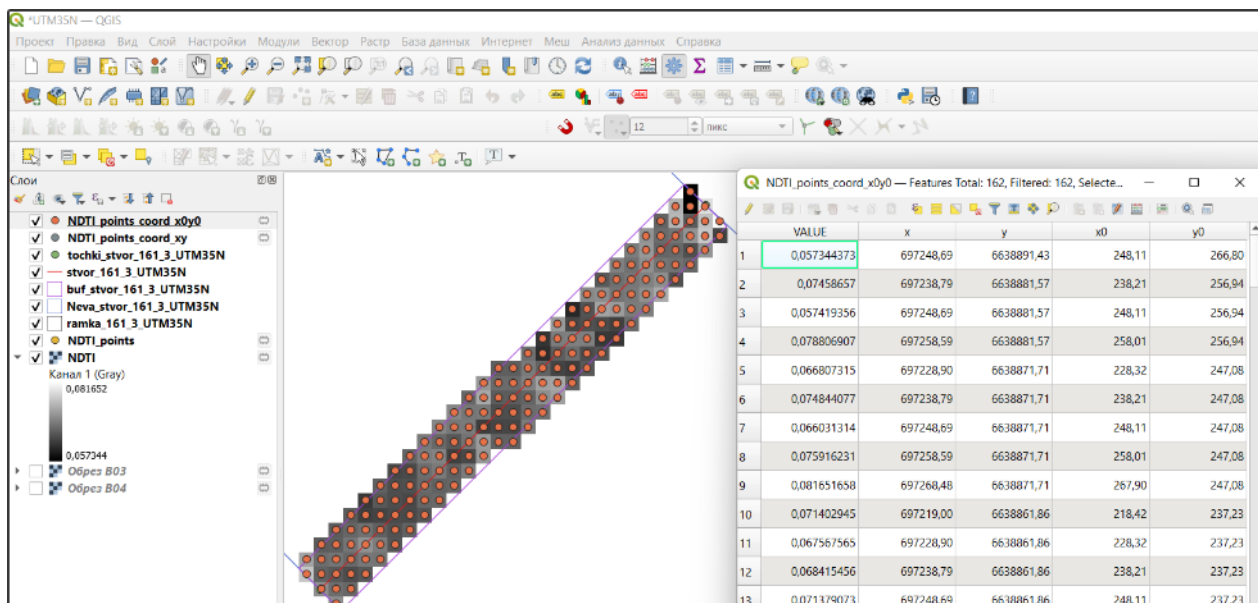


Рисунок 9 – Перенос координат

Экспортируем слой с точками створа в виде таблицы атрибутов в формате электронной таблицы MS Office Open XML [XSLX]. Рассчитываем значения Δx , Δy , гипотенузы, $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ по формулам с рис. 10.

Id	Nstvor	Dlina	x	y
1	161(3)	365,1	697000,58	6638624,63
2	161(3)	365,1	697259,32	6638882,18

Δx	258,74
Δy	257,55
hypotenuza	365,0731298
$\sin \alpha$	0,705475092
$\cos \alpha$	0,708734713

$$\Delta x = |x_1 - x_2|; \Delta y = |y_1 - y_2|; \text{hypotenuza} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2};$$

$$\sin \alpha = \frac{\Delta y}{\text{hypotenuza}}; \cos \alpha = \frac{\Delta x}{\text{hypotenuza}}.$$

Рисунок 10 – Расчёт переменных

Рассчитываем координаты x_{new} , y_{new} после поворота оси. Используя *Калькулятор полей*, найдём значение x_{new} : исходный слой берём с выхода алгоритма получения координаты y_0 ; вводим формулу (" x_0 "*0.708734713)+(" y_0 "*0.705475092), где числа — значения $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$.

Аналогично рассчитываем значение y_{new} , только исходный слой берём с выхода алгоритма расчёта x_{new} , а формулу заменяем на (" y_0 "*0.708734713)- (" x_0 "*0.705475092) — рис. 11.

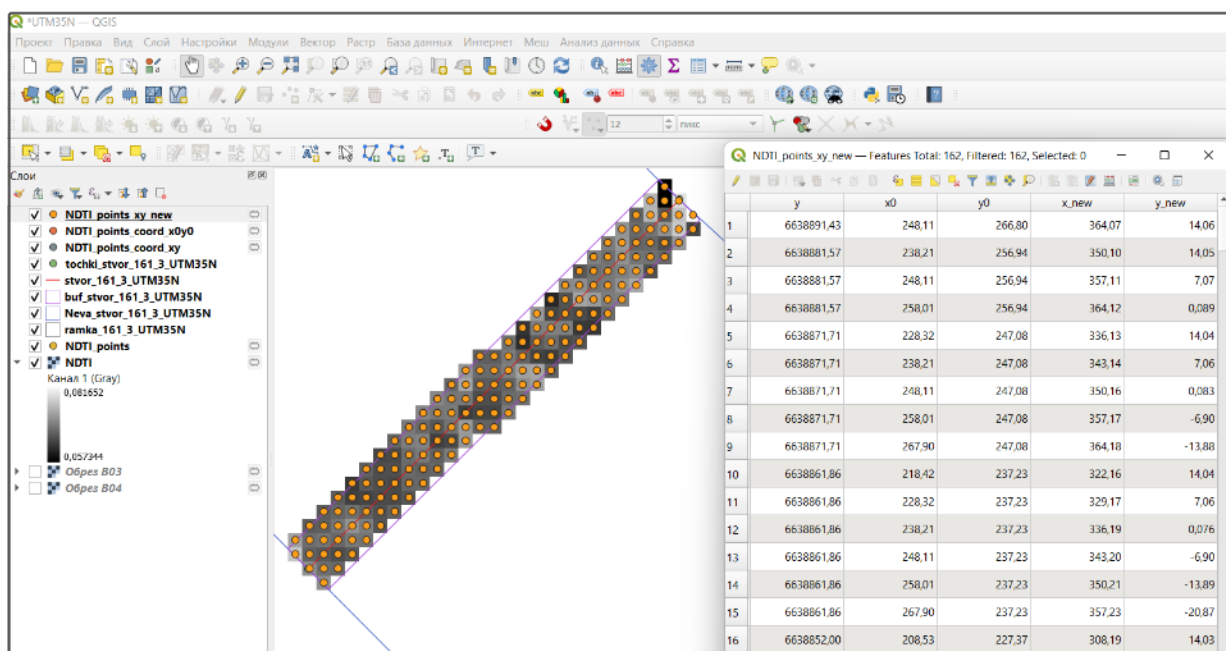


Рисунок 11 – Расчёт координат после поворота оси

Экспортируем слой с координатами x_{new} , y_{new} в виде таблицы атрибутов в формате XSLX (рис. 12).

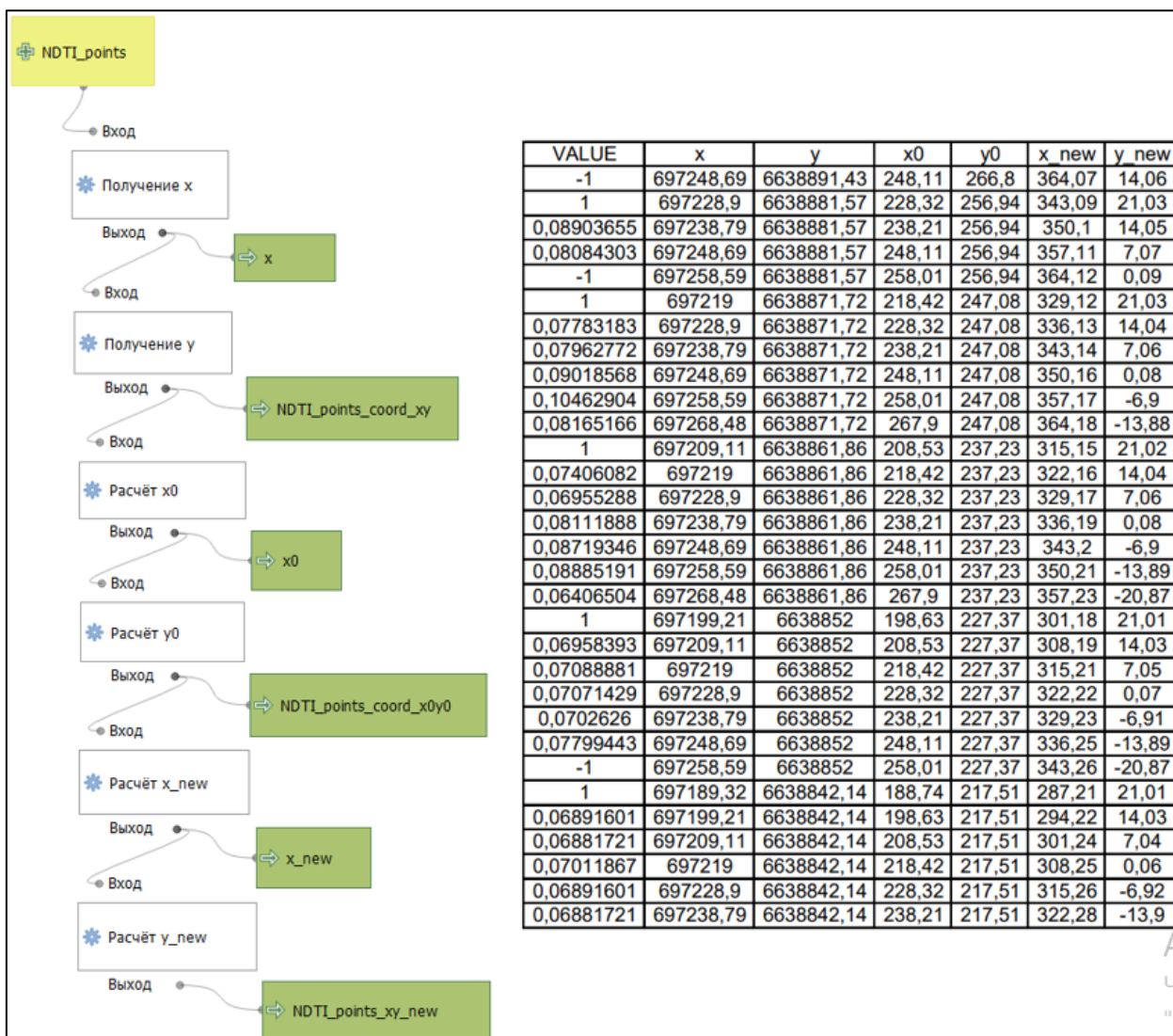


Рисунок 12 – Получение таблицы атрибутов

На этом обработка снимков в среде QGIS завершается. Дальнейшая обработка выполняется в среде Mathcad с помощью специально разработанных программ (рабочих областей).

2.3. Деление ряда

Экспортировав слой с координатами x_{new} , y_{new} , получили таблицу атрибутов в формате XSLX (рис. 13):

	A	B	C	D	E	F	G
1	VALUE	x	y	x0	y0	x_new	y_new
2	-0,05734437	697248,69	6638891,43	248,11	266,8	364,07	14,06
3	-0,07458657	697238,79	6638881,57	238,21	256,94	350,1	14,05
4	-0,05741936	697248,69	6638881,57	248,11	256,94	357,11	7,07
5	-0,07880691	697258,59	6638881,57	258,01	256,94	364,12	0,09
6	-0,06680731	697228,9	6638871,72	228,32	247,08	336,13	14,04
7	-0,07484408	697238,79	6638871,72	238,21	247,08	343,14	7,06
8	-0,06603131	697248,69	6638871,72	248,11	247,08	350,16	0,08
9	-0,07591623	697258,59	6638871,72	258,01	247,08	357,17	-6,9
10	-0,08165166	697268,48	6638871,72	267,9	247,08	364,18	-13,88
11	-0,07140294	697219	6638861,86	218,42	237,23	322,16	14,04

Рисунок 13 – Таблица атрибутов в формате XSLX

Удалим из таблицы столбцы x , y , x_0 , y_0 , y_{new} (при дальнейшей обработке они не потребуются) и отсортируем данные по возрастанию значений координаты x_{new} (рис. 14).

	A	B	C	D
1	VALUE	x_new		
2	-0,07627118	0,89		
3	-0,07110333	0,94		
4	-0,07095421	1,00		
5	-0,07294618	7,84		
6	-0,06676086	7,90		
7	-0,06789251	7,96		
8	-0,06775452	14,85		
9	-0,06585974	14,91		
10	-0,06733167	14,97		
11	-0,0661423	21,81		

Рисунок 14 – Отсортированная таблица атрибутов в формате XSLX

Сохраним таблицу, задав тип файла *CSV (разделители – запятые)* — рис.

15. Текстовый формат CSV предназначен для представления табличных

данных: строка таблицы соответствует строке текста, которая содержит одно или несколько полей, разделенных запятыми. Текст и числа, сохраненные в CSV-файле, можно легко переносить из одной программы в другую. Заменяем запятые на точки.

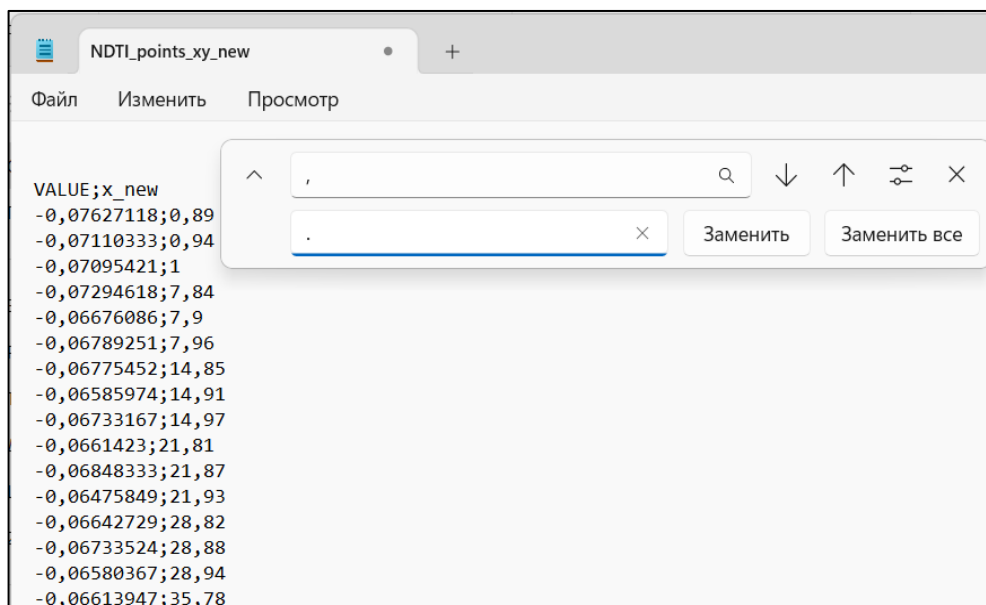


Рисунок 15 – Таблица атрибутов в формате CSV

Разделим ряд с помощью программы, предоставленной научным руководителем (рис. 16). Выберем файл исходных данных (таблицу атрибутов в формате CSV). Укажем место сохранения и названия файлов с результатами деления ряда по максимальному различию математических ожиданий и среднеквадратических отклонений.

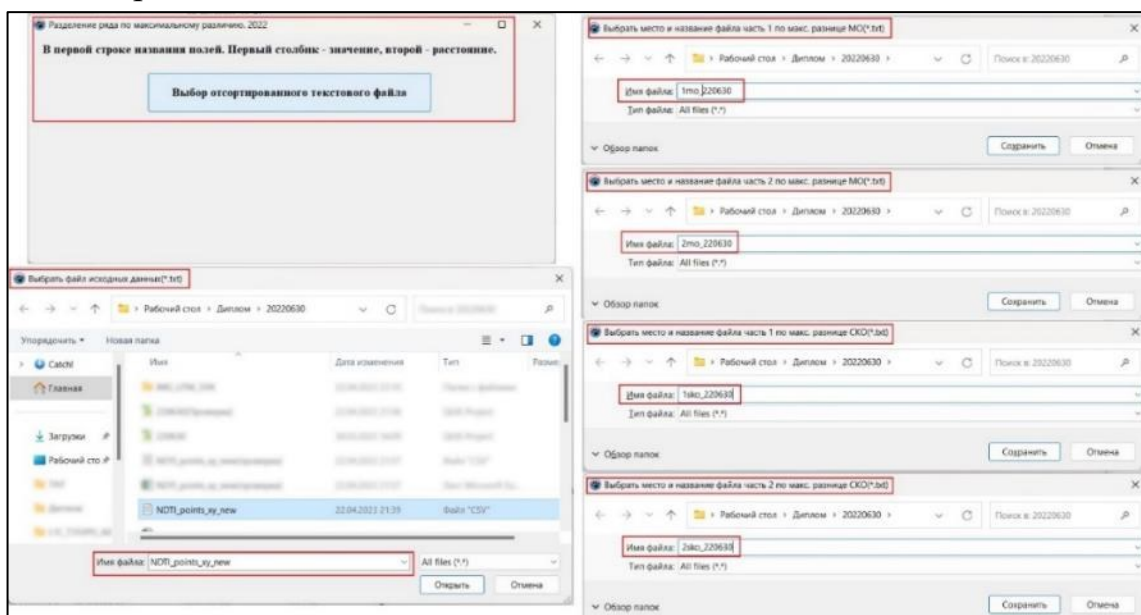


Рисунок 16 – Деление ряда
Получим 4 текстовых файла с результатами деления ряда (рис. 2.17).

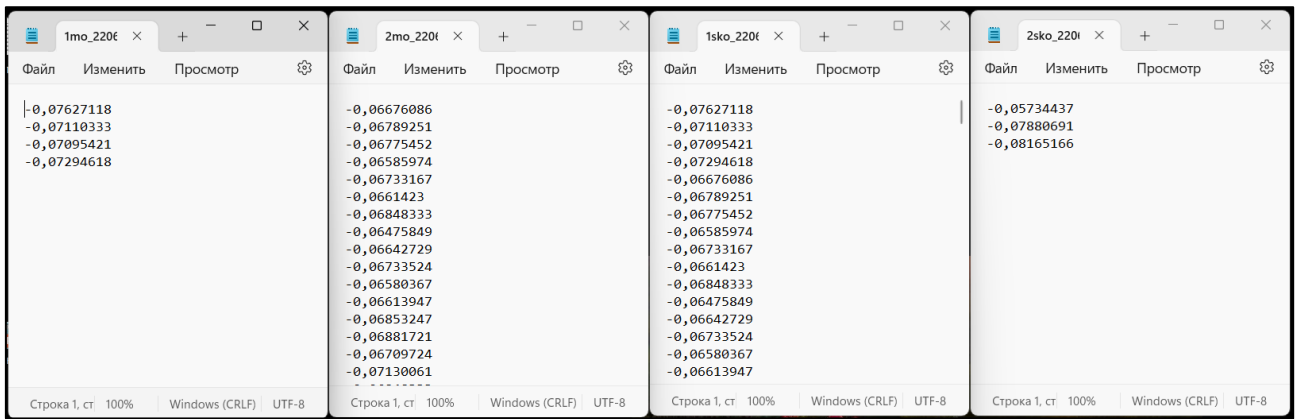


Рисунок 17 – Результаты деления ряда

Выделяются две части упорядоченного ряда значений, наиболее отличающиеся друг от друга по математическим ожиданиям или средним квадратичным отклонениям.

2.4. Оценка однородности рядов наблюдений в среде Mathcad

Откроем программы проверки выборок на однородность по критериям Зигеля-Тьюки и Уилкоксона-Манна-Уитни в среде Mathcad. Назначим ввод значений $v1$ и $v2$ из текстовых файлов с результатами деления ряда по максимальному различию математических ожиданий (рис. 2.18).

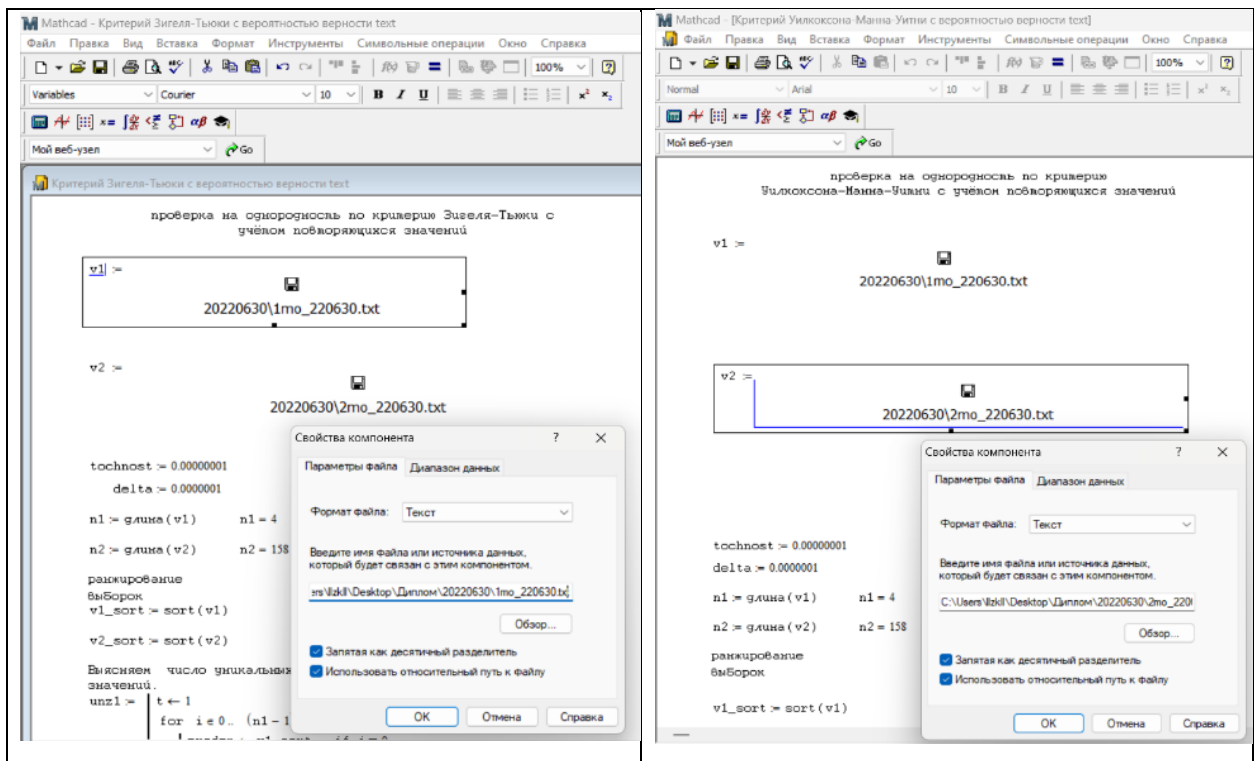


Рисунок 18 – Ввод данных из файла

Оценка тестовой статистики Зигеля-Тьюки равна $-2,013$. Ордината (квантиль) нормированного стандартного нормального распределения при

уровне значимости 10% составляет 1,645. Оценка тестовой статистики Уилкоксона-Манна-Уитни равна 61. Критические значения при уровнях значимости 0,01 и 0,05 составляют 163,6 и 468,4 соответственно. Верность гипотез — 0% в обоих случаях (рис. 2.19).

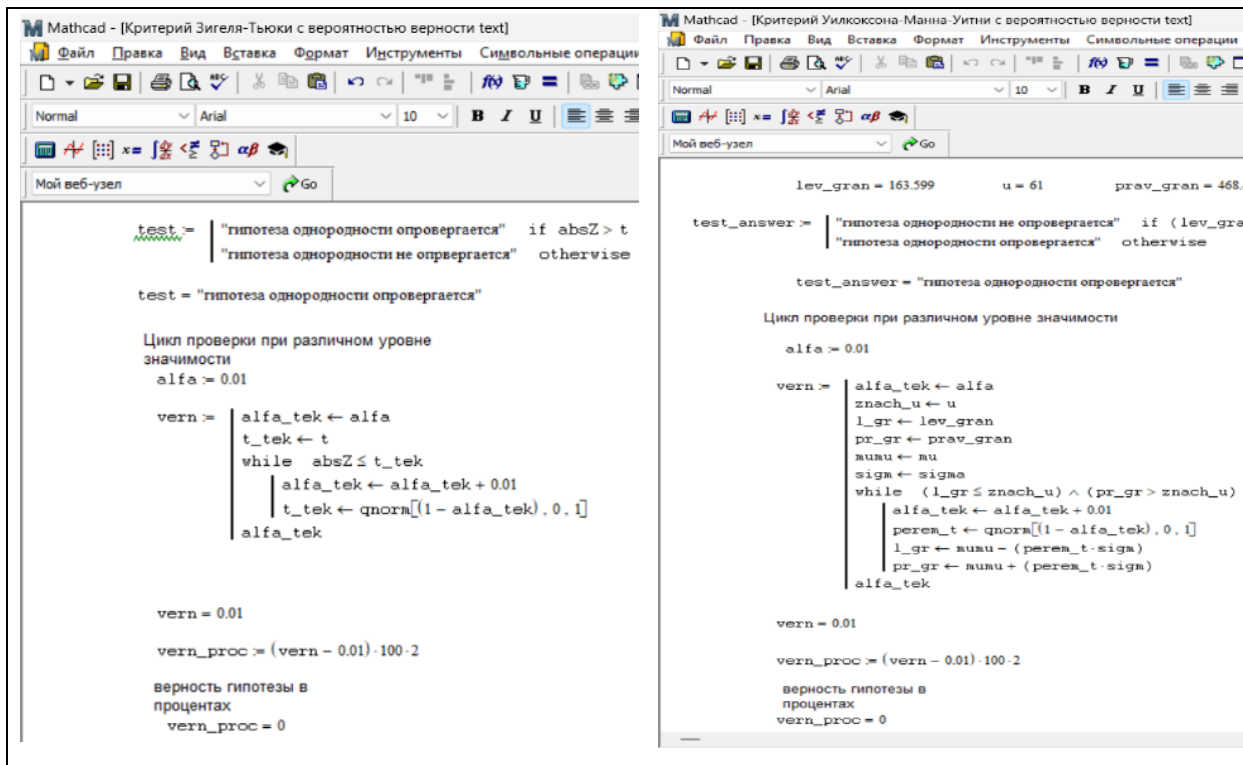


Рисунок 19 – Оценка однородности рядов

Гипотезы однородности опровергаются, так как модуль тестовой статистики Зигеля-Тьюки больше найденной ординаты ($2,013 > 1,645$), а тестовая статистика Уилкоксона-Манна-Уитни меньше критического значения при уровне значимости 0,01 ($61 < 163,6$).

2.5. Результаты исследования

Индекс мутности NDTI характеризует уменьшение прозрачности воды из-за наличия механической взвеси или же развития планктона в водном объекте. Вегетационный индекс NDVI является показателем биомассы, активной для фотосинтеза.

№ п/п	x_new	Дата					
		08.05.2023		28.05.2023		07.06.2023	
		NDTI	NDVI	NDTI	NDVI	NDTI	NDVI
1	51.11	-0.19402984	-0.19185060	-0.24779877	-0.10128914	-0.22033897	-0.02793296
2	51.76	-0.19453923	-0.18196996	-0.22981367	-0.10912342	-0.21428570	-0.01630432
3	52.35	-0.20186695	-0.18134716	-0.22864322	-0.10233393	-0.20539419	-0.01726427
4	53	-0.20327103	-0.19230770	-0.23581335	-0.08021390	-0.21129707	-0.02445653
5	53.65	-0.20605357	-0.19439580	-0.24310777	-0.08050092	-0.20794146	-0.03693572
6	54.31	-0.19354840	-0.20068611	-0.24060149	-0.09981851	-0.21390934	-0.03755217
7	54.96	-0.19450802	-0.18718381	-0.23618089	-0.10545457	-0.22832982	-0.01955304
8	55.55	-0.20984760	-0.16811092	-0.22646309	-0.09549550	-0.19794874	-0.01955671
9	56.2	-0.20838180	-0.18260874	-0.22278483	-0.08865250	-0.20707594	-0.02008031
10	56.85	-0.21162790	-0.19156414	-0.23173803	-0.07964601	-0.20833333	-0.02981030
11	57.5	-0.19630486	-0.20207255	-0.23500001	-0.09677420	-0.20502093	-0.04395602
12	58.15	-0.18807341	-0.19999997	-0.22961102	-0.11231885	-0.21601686	-0.03621169
13	58.74	-0.21893491	-0.15992969	-0.23273659	-0.08303249	-0.18907988	-0.02557545
14	58.8	-0.19362187	-0.18791945	-0.23155215	-0.08828831	-0.21703011	-0.03571428
15	59.4	-0.21353559	-0.17421602	-0.22376738	-0.08480564	-0.20082387	-0.02239793
16	60.05	-0.21436848	-0.18947369	-0.22942644	-0.09574468	-0.20582122	-0.02412865
17	60.7	-0.20368236	-0.20138890	-0.22903630	-0.10990989	-0.20250523	-0.03945574

Рисунок 20 – Значения NDTI и NDVI,

x_new — расстояние от начала створа (левый берег), м

Изменение значений индексов по длине створа (12.06.2023) представлены на рис. 20. Оси X соответствуют значения столбца x_new.

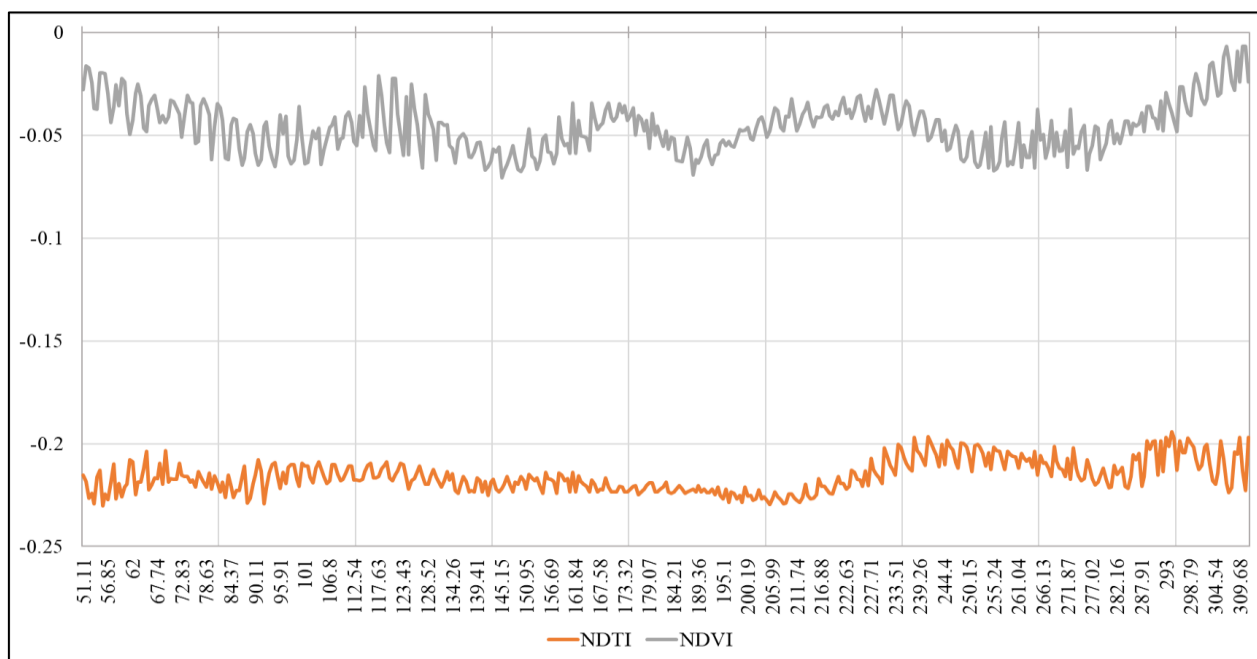


Рисунок 20 – Изменение значений индексов по длине створа 12.06.2023

Статистическое распределение значений индекса мутности NDTI за 12.06.2023 в зоне створа 161 (3) «Новосаратовка» представлено на рис. 21.

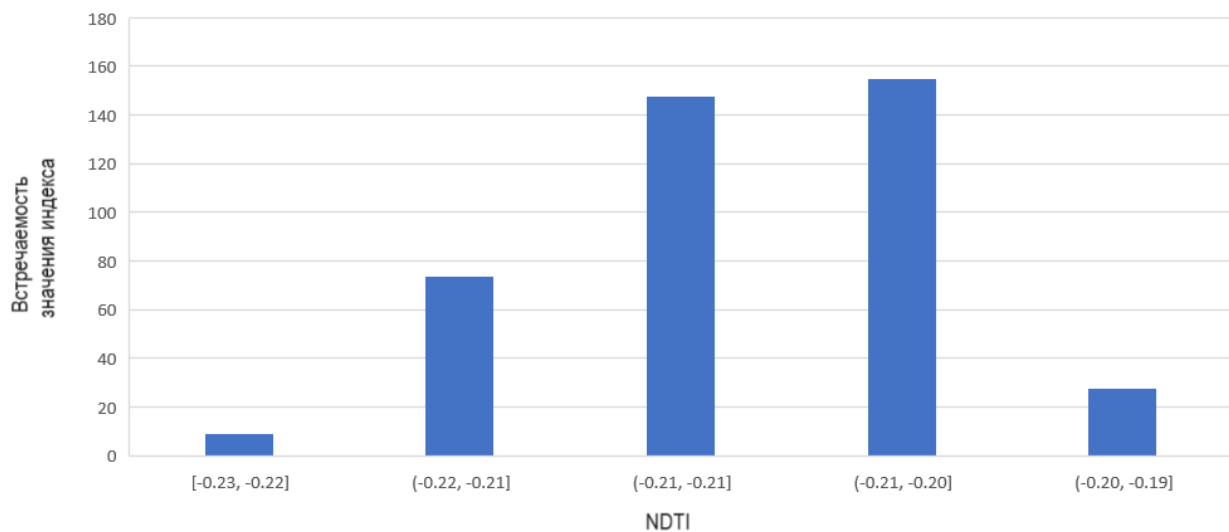


Рисунок 21 – Статистическое распределение значений индекса мутности NDTI за 12.06.2023

Результаты определения границу по матожиданиям, однородности створа по двум критериям, среднее значение индексов в створе и в отличающейся его части представлены в таблицах 5 и 6 (приложения 1 и 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные дистанционного зондирования Земли совместно с ГИС-системами позволяют анализировать водные объекты, создавать модели индексов и на их основе проводить визуальную оценку и анализ процессов эвтрофирования и загрязнения водоемов.

Исследование подтвердило возможности использования спутниковых снимков и водных индексов для анализа неоднородности мутности акваторий. В ходе оценки однородности рядов наблюдений по непараметрическим критериям гипотеза однородности была опровергнута для всех рядов наблюдений по NDVI.

Связь между значениями NDTI и NDVI отсутствует. Аналогично можно сказать и о связи между расположениями границ участков мутности створа. Отсутствие между этими индексами связи указывает на то, что мутность в реке определяется наличием именно механической взвеси, а не развитием фитопланктона.

Выявленная неоднородность буферной зоны створа мониторинга №161 (3) р. Невы указывает на неоднородность вод на створе. Вероятно, это может быть причиной возможного завышения концентраций общего азота и фосфора на этом створе по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. EarthExplorer / Архив геологической службы США (USGS). – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
2. Eutrophication / Официальный сайт Хельсинкской комиссии HELCOM. – URL: <https://helcom.fi/baltic-sea-trends/eutrophication/>.
3. HELCOM (2023): State of the Baltic Sea. Third HELCOM holistic assessment 2016-2021. Baltic Sea Environment Proceedings n°194. – ISSN 0357-2994. – URL: https://helcom.fi/post_type_publ/holas3_sobs.
4. Jordan C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor / Ecology, № 4(50). – 1969. – С. 663–666. – URL: <https://doi.org/10.2307/1936256>.
5. Sentinel Online / Сайт Европейского космического агентства (European Space Agency). – URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>.
6. Акковецкий В. И. Дешифрирование снимков / В. И. Акковецкий. – М.: Недра, 1984. – 374 с.
7. Говор А. А. Анализ стока соединений валового фосфора по длине реки Невы / А. А. Говор, В. А. Шелутко, Д. К. Алексеев // РГГМУ. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43309873>.
8. ГОСТ Р 59053-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Охрана окружающей среды. Охрана и рациональное использование вод. Термины и определения. – Дата публикации: 30 сентября 2020. – 20 с.
9. ДЗЗ и наблюдение за растениями // Сайт Совзонд. – URL: <https://sovzond.ru/press-center/news/corporate/7968/>.
10. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2021 году / Правительство Санкт-Петербурга. – СПб: 2022. – 196 с. – URL: <https://www.infoeco.ru/index.php?id=982>.
11. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2022 году / Под редакцией А. В. Германа, И. А. Серебрицкого // Правительство Санкт-

Петербурга. – СПб: 2023. – 226 с. – URL: <https://www.infoeco.ru/index.php?id=982>.

12. Жолобов Д. А., Баев А. В. Уточнение значений нормализованного вегетативного индекса (NDVI), методом наложения транспирационной маски // Инновации в науке: сб. Ст. По матер. XLV междунар. Науч.-практ. Конф. – № 5(42). – Новосибирск: СибАК. – 2015.

– URL: <https://sibac.info/conf/innovation/xlv/42254>.

13. Ибрагимова К. К. Словарь-справочник терминов по экологии и охране природы: учебное пособие / К. К. Ибрагимова, И. И. Рахимов, А. И. Зиятдинова. – Казань: «Отечество», 2012. – 148 с.

14. Катаев М. Ю. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям / М. Ю. Катаев, А. А. Бекеров // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 105–108.

15. Качество вод поверхностных водных объектов / ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». – URL: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=1536>.

16. Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегодник-2021 / Росгидромет, ФГБУ «ГХИ». – Ростов-на-Дону, 2022. – 620 с. – ISBN 978-5-6046424-2-9.

– URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/ezhegodniki/>.

17. Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегодник-2022 / Росгидромет, ФГБУ «ГХИ». – Ростов-на-Дону, 2023. – 613 с. – ISBN 978-5-6046424-2-9.

– URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/ezhegodniki/>.

18. Морозова В. А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования / В. А. Морозова // Современные проблемы территориального развития: электронный журнал. – URL: <https://terjournal.ru/2019/id85/>.

19. Официальный сайт программы Copernicus Европейского космического агентства.

– URL: <https://www.copernicus.eu/en>.

20. Третьяков В. Ю., Заколюкина А. А., Клубов С. М. Методика оценки однородности створов мониторинга рек по оптической характеристике водной поверхности — индексу мутности // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационная поддержка устойчивого развития регионов в условиях кризиса: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ. – 2023. – т. 29. – ч. 1. – 694 с. – С. 330–345. – ISSN 2414-9179 (Print). – ISSN 2414-9209 (Online). – DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-330-345. – URL: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-330-345>.

21. Трофимчук М. М. Качество поверхностных вод / Росгидромет. – Ростов-на-Дону: ФГБУ «Гидрохимический институт», 2022. – 620 с.

22. Sharma, Vivek & Irmak. Quantification and Mapping of Surface Residue Cover for Maize and Soybean Fields in South Central Nebraska / Sharma, Vivek & Irmak, Suat & Kilic, Ayse & Gilley, J.E. & Meyer, George & Knezevic, S.Z. & Marx, David // Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers 59(3):925-939. – 2016. – DOI: 10.13031/trans.59.11489. – URL: https://www.researchgate.net/publication/305445861_Quantification_and_Mapping_of_Surface_Residue_Cover_for_Maize_and_Soybean_Fields_in_South_Central_Nebraska.

23. Singh, Ankita & Vyas, Vipin. A Review on Remote Sensing application in river ecosystem evaluation / Spatial Information Research. – 2022. – DOI: 10.1007/s41324-022-00470-5. – URL: https://www.researchgate.net/publication/362647976_A_Review_on_Remote_Sensing_application_in_river_ecosystem_evaluation.

Приложение 1.

Таблица 4 – Данные по INVT: граница — результат деления створа по максимальному различию математических ожиданий (п — правый, л — левый берег); В-М-У — оценка однородности по критерию Уилкоксона-Манна-Уитни (не — гипотеза однородности опровергается, да — не опровергается (вероятность в %)); З-Т — оценка однородности по критерию Зигеля-Тьюки; Ср. знач. — среднее значение индекса во всём створе; Ср. знач. гр. — среднее значение индекса у берега (столбец Граница)

NDVI																	
2021						2022						2023					
Дата	Граница	У-М-У	З-Т	Ср. знач.	Ср. знач. гр.	Дата	Граница	У-М-У	З-Т	Ср. знач.	Ср. знач. гр.	Дата	Граница	У-М-У	З-Т	Ср. знач.	Ср. знач. гр.
11.04.2021	п	не	не	-0.24	-0.21	21.04.2022	п	не	не	-0.29	-0.27						
18.04.2021	п	не	не	-0.23	-0.24												
11.05.2021	п	не	не	-0.13	-0.08	03.05.2022	п	не	не	-0.18	-0.16	08.05.2023	л	не	не	-0.19	-0.18
						21.05.2022	п	не	не	-0.20	-0.17	28.05.2023	п	не	не	-0.11	-0.09
07.06.2021	п	не	не	-0.10	-0.07	07.06.2022	п	не	не	-0.11	-0.08	07.06.2023	п	не	не	-0.04	-0.01
17.06.2021	п	не	не	-0.10	-0.06	27.06.2022	п	не	не	-0.11	-0.08	12.06.2023	п	не	не	-0.07	-0.05
30.06.2021	п	не	не	-0.15	-0.12	30.06.2022	п	не	не	-0.16	-0.11	17.06.2023	п	не	не	-0.01	0.00
05.07.2021	п	не	не	-0.14	-0.08	22.07.2022	п	не	не	0.06	0.09						
07.07.2021	п	не	не	-0.09	-0.07												
15.07.2021	п	не	не	-0.11	-0.08												
17.07.2021	п	не	не	-0.07	-0.02												
27.07.2021	п	не	не	-0.10	-0.08												
						14.08.2022	п	не	не	-0.16	-0.10	31.08.2023	п	не	не	-0.09	-0.08
						16.08.2022	п	не	не	-0.09	-0.06						
						19.08.2022	п	не	не	-0.09	-0.05						
						10.09.2022	п	не	не	-0.25	-0.20	10.09.2023	п	не	не	-0.11	-0.06
						23.09.2023	п	не	не	-0.18	-0.16						
						25.10.2022	п	не	не	-0.30	-0.27	10.10.2023	п	не	не	-0.12	-0.11
						30.10.2022	л	не	не	-0.27	-0.32						

Приложение 2.

Таблица 5 – данные по IDTI (обозначения аналогично талбл. 5).

NDTI																	
2021						2022						2023					
Дата	Граница	У-М-У	З-Т	Ср. знач.	Ср. знач. гр.	Дата	Граница	У-М-У	З-Т	Ср. знач.	Ср. знач. гр.	Дата	Граница	У-М-У	З-Т	Ср. знач.	Ср. знач. гр.
11.04.2021		да	да	-0.19		21.04.2022	л	не	не	-0.18	-0.17						
18.04.2021	л	не	не	-0.19	-0.17												
11.05.2021	л	не	не	-0.16	-0.14	03.05.2022	л	не	не	-0.16	-0.19	08.05.2023	л	не	не	-0.20	-0.19
						21.05.2022	п	не	не	-0.18	-0.20	28.05.2023	п	не	не	-0.24	-0.22
07.06.2021	п	не	да	-0.22	-0.21	07.06.2022	л	не	не	-0.23	-0.22	07.06.2023	п	не	не	-0.19	-0.20
17.06.2021	п	не	не	-0.22	-0.21	27.06.2022	п	не	не	-0.22	-0.23	12.06.2023	п (сер)	не	не	-0.21	-0.20
30.06.2021	л	не	не	-0.19	-0.16	30.06.2022	п	не	не	-0.24	-0.25	17.06.2023		да (49)	да (28)	-0.19	-0.19
05.07.2021	л	не	не	-0.22	-0.21	22.07.2022	л	не	не	-0.15	-0.14						
07.07.2021		да	да	-0.20													
15.07.2021		да (12)	да	-0.20	-0.20												
17.07.2021		да	да	-0.20													
27.07.2021	л	не	не	-0.20	-0.19												
						14.08.2022		да	да	-0.25		31.08.2023 л (сер) не не -0.19 -0.20					
						16.08.2022		да (24)	да (12)	-0.22	-0.22						
						19.08.2022		не	не	-0.21							
						10.09.2022		да (16)	да	-0.22	-0.22	10.09.2023	п	не	не	-0.20	-0.19
												23.09.2023	л	не	да (28)	-0.21	-0.20
						25.10.2022		да	да	-0.23		10.10.2023 да да (12) -0.05 -0.05					
						30.10.2022	л (сер)	не	да (44)	-0.20	-0.21 (л), -0.18 (п)						