

Мониторинг шлейфов городских очистных сооружений Санкт-Петербурга аэрокосмической тепловой съёмкой

А.А. Тронин, Б.В. Шилин

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр
экологической безопасности РАН
197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18
E-mail: tronin@at1895.spb.edu*

Для оценки влияния шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга на экологическое состояние Невской губы был выполнен комплекс авиационных и спутниковых съёмок акватории. Результаты обработки показали высокую эффективность применения аэрокосмической тепловой и многоспектральной съёмки для прослеживания шлейфов очистных сооружений. Совместная обработка результатов спутниковой и авиационных съёмки шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга позволила построить общую схему распространения шлейфов. По материалам космической съёмки выявлены шлейфы всех очистных сооружений города. Анализ распределения шлейфов очистных сооружений показал, что их пространственное положение в акватории стабильно в большинстве метеорологических обстановок и не оказывает влияния на экологическое состояние рекреационных зон на южном берегу Невской губы.

Введение

В девяностых годах прошлого века экологическая ситуация в Невской губе и Восточной части Финского залива существенно улучшалась из-за снижения антропогенной нагрузки вследствие общего промышленного спада и постоянного уменьшения сбросов сточных вод в акватории. Однако после 2000 года с началом периода экономического роста РФ, объёмы производства ежегодно возрастают, резко увеличились морские перевозки, что безусловно отражается на экологической обстановке в акватории.

В сентябре 2005 года после пуска и ввода в эксплуатацию Юго-Западных городских очистных сооружений (ЮЗОС) была завершена многолетняя программа по канализованию сточных вод Санкт-Петербурга. Стратегией водоохранной деятельности ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» предусмотрен постоянный экологический, включая аэрокосмический, мониторинг акваторий р. Невы и Невской губы. Эпизодический аэрокосмический мониторинг выполнялся НИЦЭБ РАН по заданиям ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» путем проведения дистанционного обследования и картографирования выпусков сточных вод (1989, 1991, 2002, 2004 гг.). На отдельных участках акваторий проводилась тепловая аэросъёмка в 2005 и 2006 гг.

Для решения проблемы мониторинга шлейфов выпусков городских очистных сооружений в Невской губе по ретроспективным и современным данным дистанционного зондирования по заказу ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» были начаты исследования по мониторингу шлейфов городских очистных сооружений Санкт-Петербурга аэрокосмической тепловой съёмкой. Целью работы является оценка влияния шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга (Центральной станции аэрации – ЦСА, Северной станции аэрации – ССА, ЮЗОС) на Невскую губу.

Для решения поставленной задачи на первом этапе был выполнен ряд работ: определён оптимальный режим спутниковых съёмок, проведён анализ архивов спутниковых данных, отобраны материалы спутниковых съёмок на оптимальный временной интервал, заказаны и приобретены спутниковые данные, проведена обработка космических снимков. Основной задачей второго этапа работ было выполнение тепловой аэросъёмки мест выпусков очистных сооружений. Было выполнено три тепловых авиасъёмки Невской губы: 10, 14 и 31 мая 2006. Проведена предварительная и тематическая обработка результатов тепловой аэросъёмки Невской губы.

В зимний период, когда Невская губа покрыта льдом, мониторинг выпусков осуществлялся с помощью многоспектральной съёмки системами высокого разрешения IKONOS и Quickbird. Теп-

ловые шлейфы создают полынью в ледовом покрове, достоверно фиксируемую по разнице отражательной способности системы снег/лёд – вода. Были выполнены три съёмки выпусков очистных сооружений в ледовый период.

Физические основы применения тепловой аэрокосмической съёмки для мониторинга шлейфов городских очистных сооружений

Возможность применения аэрокосмической тепловой съёмки для мониторинга шлейфов городских очистных сооружений определяется температурным контрастом шлейфа и объёмом сброса вод. Температурный контраст определяется как разница температуры выпускных вод и окружающей воды. Температура выпускных вод может быть оценена как температура вод в выпускной камере очистных сооружений. Температуру окружающих, фоновых вод оценить значительно сложнее. Для среднемесячных значений можно приравнять температуру воды к температуре воздуха. Таким образом, температурный контраст определяется как разница температур выпускной камеры очистных сооружений и среднемесячной температуры воздуха. В таблице 1 приведены данные по температурным контрастам ССА.

Из анализа полученных данных очевидно, что максимальный контраст наблюдается в холодный период – с сентября по май. Он находится в пределах 8 – 28 °С. В реальных условиях значения температурного контраста значительно меньше – несколько градусов. Важно отметить, что температурный контраст всегда положителен, то есть температура шлейфа всегда теплее окружающих вод. Тёплые сточные воды имеют меньшую плотность, чем окружающие их воды, что приводит к их подъёму на поверхность.

Объём сброса вод составляет величины около 7.5 м³/с для ССА и 15.5 м³/с для ЦСА. Этих значений достаточно для формирования потока вод, фиксируемых тепловой аэрокосмической съёмкой.

Таблица 1. Температурный контраст для ССА

<i>Месяц</i>	<i>Температура воды в выпускной камере, °С</i>	<i>Температура воздуха, °С</i>	<i>Разность температур, °С</i>
Январь	19.3	-8.9	28.2
Февраль	19.8	-5.8	25.6
Март	20.8	-0.7	21.5
Апрель	21.3	4.6	16.7
Май	22	10.6	11.4
Июнь	24.3	14.4	9.9
Июль	25.3	17.8	7.5
Август	25.3	17.4	7.9
Сентябрь	24.3	12.8	11.5
Октябрь	23	6.1	16.9
Ноябрь	22.5	-0.6	23.1
Декабрь	21.8	-1.0	22.8

Здесь же целесообразно отметить основные черты исследуемых объектов – шлейфов городских очистных сооружений и окружающей их среды – вод Невской губы. Шлейфы представляют собой вытянутые по течению объекты, с линейными размерами: длина – сотни метров – километры, ширина – десятки метров – сотни метров. Амплитуда аномалии (шлейфа) достигает 2 – 3 градусов, хотя обычно составляет величины 0.2 – 0.5 градуса. Окружающая среда представлена водами Невской губы, которые можно характеризовать, как пресные воды с высоким содержанием

растворённых органических соединений. Количество взвешенных веществ в воде сильно варьирует в зависимости от антропогенной деятельности.

Аппаратура

Из всего набора спутниковых данных нами были проанализированы возможности спутниковых систем и сканеров, способные решить задачу прослеживания шлейфов очистных сооружений (таблица 2). Из систем высокого разрешения, обеспечивающих мониторинг шлейфов очистных сооружений, следует использовать как спутник Landsat из-за большой глубины архивов и высокого разрешения теплового канала, так и спектрорадиометр ASTER (спутник Terra) из-за лучших технических характеристик и низкой стоимости. Поэтому для выполнения работы были использованы данные спутников Terra (ASTER) и Landsat (TM и ETM).

Таблица 2. Таблица некоторых характеристик спутниковых систем

Спутник	Landsat-7	SPOT-5	JERS-1	ADEOS	Terra	IRS-1C/1D	IRS-1C/1D
Сканер	ETM	HRG	OPS	AVNIR	ASTER	LISS-3	PAN
Спектральные каналы:							
VNIR (0.4-1 мкм)	4	3	3	4	3	3	1
SWIR (1-2.5 мкм)	2	1	4	-	6	1	-
MIR (2.5-5 мкм)	-	-	-	-	-	-	-
IR (5-12.5 мкм)	1	-	-	-	5	-	-
Пространственное разрешение (VNIR/SWIR/MIR&TIR), м	30/30/60	10/20	18	16	15/30/90	23/70	5.8
Дополнительный канал	Панхром	Панхром	Сtereo вперёд	Панхром	Сtereo назад	-	-
Спектральный диапазон, мкм	0.5-0.9	0.48-0.71	0.76-0.86	0.52-0.69	0.78-0.86	-	-
Разрешение, м	15	2.5	18	8	15		
Ширина полосы обзора, км	185	60	73	80	60	140	70
Квантование (VNIR/SWIR/MIR&TIR), бит	8	8	6	8	8/8/12	7	6
Повторяемость съёмки, дни	8-16	1-4	14	7-14	8-16	3	3
Время пересечения экватора	10:00	10:30	10:30- 11:00	10:15 - 10:45	10:30	10:40	10:40

Кроме вышперечисленных систем было предложено использовать системы сверхвысокого разрешения IKONOS и QuickBird, имеющие разрешение до 2.5 м в спектральных каналах и 60 см в панхроматическом канале.

Тепловая аэросъёмка выполняется авиационным тепловизором – прибором для регистрации теплового излучения земной поверхности [1, 2]. За счёт движения самолёта и сканирования поперёк движения носителя тепловизор формирует тепловое изображение земной поверхности. Примером такого прибора служит современный тепловизионный авиационный комплекс «Малахит-М».

В ряде случаев тепловизор устанавливается на гироскопической платформе, обеспечивающей пространственную стабилизацию тепловизора в пространстве во время съёмки. В таблице 3 приведены основные характеристики тепловизионного комплекса «Малахит-М».

Данные

Для выполнения исследований использовались данные тепловой аэросъёмки, спутниковой многоспектральной и тепловой съёмок, метеорологические данные.

Для выполнения работ были отобраны 7 сцен спутников Landsat-5 и Landsat-7. Главным образом отбирались снимки на весенний период. Для прослеживания шлейфов очистных сооруже-

ний были отобраны 10 сцен спутников сканера ASTER спутника Terra. Главным образом отбирались снимки на весенний и осенний период, также отобраны две сцены с изображением ледовой обстановки в Невской губе. Использовались как утренние, так и вечерние сцены.

Таблица 3. Основные технические характеристики тепловизионного комплекса «Малахит-М»

№№	Наименование параметра	Значение	
1	Температурное разрешение на уровне 20 ⁰ С при отношении сигнала к шуму равном 1, град.	0.1-0,15	
2	Угол мгновенного поля зрения, мрад, не хуже	1,5	
3	Угол поля обзора, угл. град.	120	
	Обзор по строке обеспечивает захват на местности	3,4 высоты	
4	Максимальная относительная скорость авианосителя, 1/сек	0,2	
5	Спектральный диапазон, мкм	8-14	
6	Частота строк, Гц	125	
7	Скорость вращения сканирующей призмы, об/мин	1875	
8	Разрядность данных аэросъемки, бит	12	
9	Электропитание от бортсети авианосителя, В	27	
10	Вес аппаратуры, кг		
	в т.ч	оптико-механический блок	12
		электронные блоки	3
		компьютер	12
11	Приемник спутниковой навигации	GARMIN	
12	Точность привязки к местности, не хуже, м	2	

Для картирования сброса очистных сооружений в зимний сезон для ледовой съёмки привлекались данные систем высокого разрешения Ikonos и Quickbird. Были использованы 4 снимка высокого разрешения.

На первом этапе работ использовались данные тепловой аэросъёмки выполненной ранее. На втором этапе работ предусматривалось выполнение тепловой аэросъёмки акватории Невской губы с целью картирования шлейфов очистных сооружений. В весенний период было выполнено три полёта, общий объем лётных работ составил около двух лётных часов. Съёмка проводилась силами предприятия ООО "Аэроэкология". Работы выполнялись на вертолёте Ми-8. На борту был установлен комплекс тепловизора "Малахит" с бортовыми компьютерами, а также навигационный комплекс GPS.

Отбор метеорологических данных проводился для интерпретации материалов дистанционного зондирования. Отбирались данные по температуре воздуха, атмосферному давлению на уровне моря, относительной влажности, направлению и скорости ветра. Кроме того, были собраны метеорологические данные по 2005 г. для анализа репрезентативности данных аэрокосмической съёмки.

Методика обработки данных дистанционного зондирования

Методика обработки данных дистанционного зондирования содержит общие процедуры, как для аэросъёмки, так и для спутниковой съёмки. Они заключаются в предварительной обработке, когда исходные данные подвергаются разнообразным процедурам фильтрации и нормализации информации. В результате предварительной обработки данных дистанционного зондирования получают географически привязанные изображения физических характеристик земной поверхности. Затем происходит тематическая обработка, когда решаются конкретные прикладные задачи, в нашем случае – прослеживание шлейфов очистных сооружений. Основной метод решения поставленной задачи – космическая и авиационная тепловая съёмка. Поэтому основное внимание в

методике обработки данных дистанционного зондирования уделено тепловым методам. В НИЦЭБ РАН накоплен большой опыт по использованию тепловой съёмки для исследования акваторий.

Методика предварительной обработки спутниковых данных не отличается от стандартной. В результате предварительной обработки из исходных изображений были получены карта-схемы температуры водной поверхности на площадь Невской губы, несущие информацию о пространственном распределении тепловых шлейфов очистных сооружений. Пример такой карта-схемы показан на рис. 1.

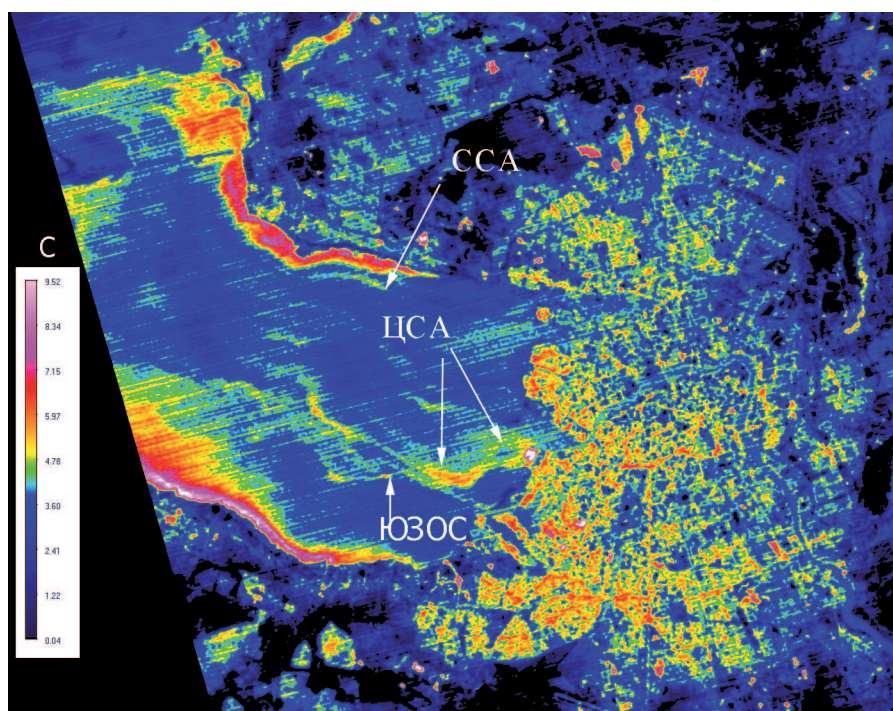


Рис. 1. Тепловые шлейфы очистных сооружений Санкт-Петербурга. Тепловой снимок сканера ASTER от 29 апреля 2006 г. Стрелками показаны выпуски ЮЗОС, ССА и ЦСА

Тематическая обработка в нашем случае заключалась в построении карты-схемы дешифрирования шлейфов очистных сооружений в Невской губе. По результатам предварительной обработки проводилось дешифрирование космических тепловых и многоспектральных снимков. Оформление результатов обработки проводилось в среде географической информационной системы ArcGIS.

Данные тепловой аэросъёмки нуждаются в серьёзной предварительной обработке. Была выполнена геометрическая коррекция данных и их привязка к картографической основе. При выполнении тепловой аэросъёмки производилась запись положения вертолётa с помощью навигационной системы GPS. Имея в своём распоряжении записи о географическом положении носителя в определённые моменты времени, была выполнена трансформация данных тепловой аэросъёмки в карта-схему Невской губы. Одновременно проводилась коррекция данных тепловой аэросъёмки для компенсации искажений, вызванных системой сканирования.

Данные тепловой аэросъёмки представляли собой тепловизионные сканерные шестнадцатититовые изображения с размерами (в пикселах) 3600x10000 и данные о географической привязке маршрута в виде файла, содержащем информацию GPS-приемника, установленного на борту летательного аппарата, и регистрирующего его полные координаты каждые три секунды полета. Указанные выше изображения представляли собой фрагменты полных изображений маршрутов съёмки акватории Невской губы. Цель обработки – произвести яркостную и геометрическую

коррекции и получить изображение акватории в формате GeoTIFF, пригодном для последующей интерпретации и совместной обработки с данными космических съемок.

Обработка данных выполнялась последовательно, в следующем порядке: Удаление полос – Масштабирование – Склеивание фрагментов изображений в полное изображение, соответствующее маршруту съемки – Выравнивание строк изображения маршрута – убираются дефекты, вызванные эволюциями летательного аппарата, и дефекты авиасканера – Геометрическая коррекция сканерного изображения – Трансформация – приведение к картографической проекции – Склеивание мозаики выходного изображения из изображений маршрутов – Географическая привязка полученной тепловой мозаики. В результате выполнения этой операции изображение трансформируется в географически привязанное и сохраняется в формате GeoTIF.

Затем производится, если необходимо, преобразование результата работы к восьмибитовому формату данных, наиболее часто используемому в приложениях. Таким образом, в результате обработки данных авиационной тепловой съёмки получаем топографически привязанные изображения температуры водной поверхности.

Результаты обработки данных дистанционного зондирования

На весенних снимках отчётливо прослеживаются тепловые шлейфы от ССА и ЦСА. Шлейф от ССА прижат к северному берегу Невской губы и часто сливается с нагретыми областями мелководья. В южной части губы всё время наблюдаются повышенные температуры воды из-за высокой мутности воды, мелководья и малой скорости течения.

На тепловом снимке от 29 апреля 2006 г. сканера ASTER (рис. 1) отчётливо прослеживаются все выпуски очистных сооружений. Шлейф ССА прослеживается до о. Верперлуда, а шлейф ЦСА – вдоль морского канала, с северной стороны. Он распространяется до траверса Петергофа. Шлейф от ЮЗОС прослеживается вдоль южного края морского канала в западном направлении, не доходя до Знаменки. Линейный размер шлейфа достигает 5 км в длину и 200 м в ширину.

На летних снимках тепловые шлейфы не прослеживаются, так как температура выпусков близка к температуре поверхности воды в Невской губе.

Осенний аспект съёмки представляется наиболее оптимальным для мониторинга шлейфов очистных сооружений. На снимках 29 сентября 2001 г. и 7 октября 2004 г. отчётливо прослеживаются как шлейфы ССА, так и ЦСА. Характер распространения шлейфов соответствует весеннему: шлейф от ЦСА проходит вдоль северного края морского канала, не пересекая его. Шлейф от ССА движется вдоль северного берега Невской губы к КЗС.

Для анализа структуры течений и контроля мутности воды в Невской губе были использованы снимки в видимом и БИК диапазоне. На многоспектральных снимках шлейфы очистных сооружений при естественной мутности вод в Невской губе не прослеживаются. Это означает, что мутность сбрасываемой воды не превышает мутности вод в Невской губе. При повышении мутности вод, вызванном, например, работами по намыву территорий, мутность сточных вод становится значительно ниже мутности вод в Невской губе.

Зимний аспект наблюдений интересен тем, что позволяет увидеть интегральное, осреднённое распределение шлейфов очистных сооружений в структуре льда и полыньях. Лучше всего использовать для дешифрирования снимки сделанные ранней весной, когда ледовый покров в Невской губе ещё сохраняет целостность, но температура воздуха уже повысилась.

На снимке 2 апреля 2003 (рис. 2) отражена ледовая обстановка в Невской губе. На снимках отчётливо прослеживаются шлейфы ССА. Шлейф распространяется до КЗС, при этом перед дамбой поток делится на два или три потока, проходя в водопропускные сооружения В4, В5, В6, главным образом в В5 и В6. Полынья от шлейфа ССА достаточно узкая, около 30-150 м. Шлейф прослеживается даже подо льдом, цвет льда и его структура над шлейфом заметно отличаются от окружающих участков. Полынья от шлейфа ЦСА значительно больше по площади, но имеет относительно малую длину. Открытая вода наблюдается не далее

дамбы морского канала. По изменённой структуре льда можно проследить шлейф от ЦСА до Кронштадта.

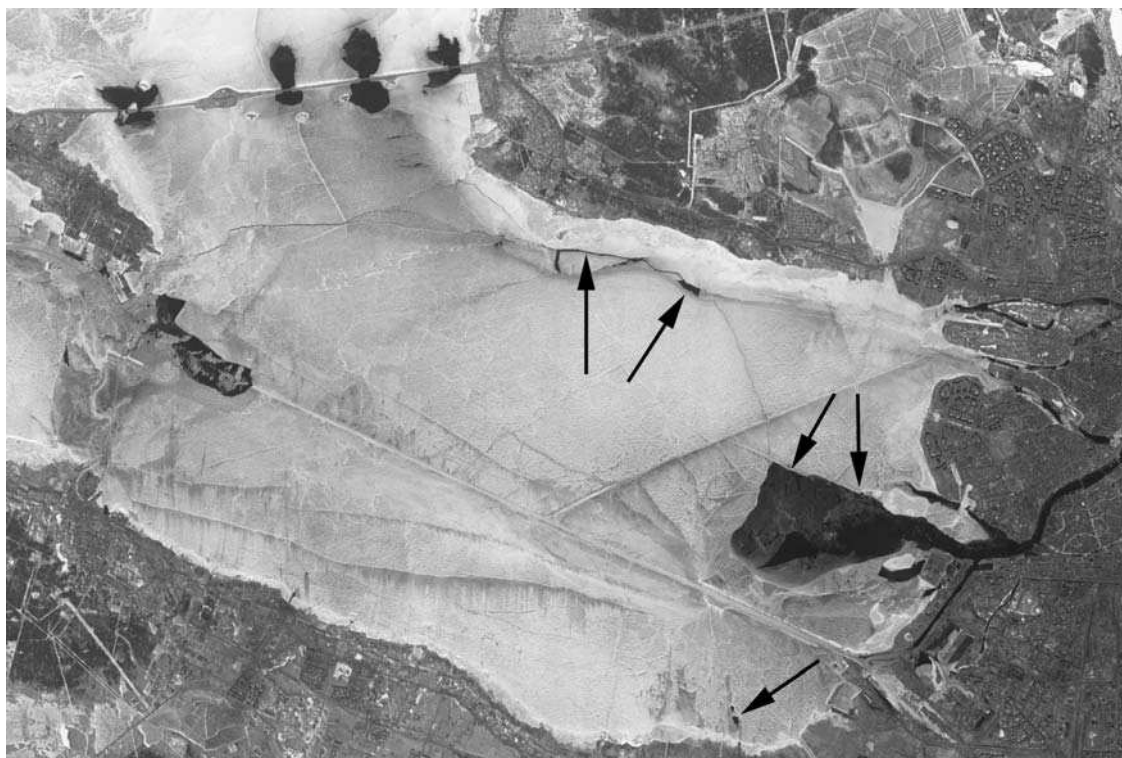


Рис. 2. Шлейфы очистных сооружений Санкт-Петербурга в зимних условиях. Космический снимок сканера ASTER от 2 апреля 2003 г. Стрелками показаны выпуски ЦСА, ССА и Красносельских очистных сооружений

Данные высокого разрешения спутников Ikonos и QuickBird позволили детально проследить развитие ледового покрова в районе шлейфов очистных сооружений.

Результаты применения тепловой аэросъёмки позволяют проследить детали шлейфов очистных сооружений. На рис. 3 показана детальная структура шлейфов ССА. Видны отдельные струи выпусков.



Рис. 3. Тепловой аэроснимок северной части Невской губы 10 мая 2006 г. Стрелками показан шлейф выпусков ССА

Совместная обработка результатов спутниковой и авиационной съёмок шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга позволила построить общую схему распространения шлейфов (рис. 4). С каждого снимка, где дешифрируются шлейфы очистных сооружений, контур шлейфа переносился на схему дешифрирования. Различные контура соответствуют разным датам съёмки.

Анализируя полученную схему можно сделать выводы о стабильности путей распространения шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга. Стабильность шлейфов определяется

главным образом направлением течений в Невской губе, которые в свою очередь, зависят от стока Невы. Шлейфы ССА направлены вдоль северного берега Невской губы, в направлении КЗС. Как

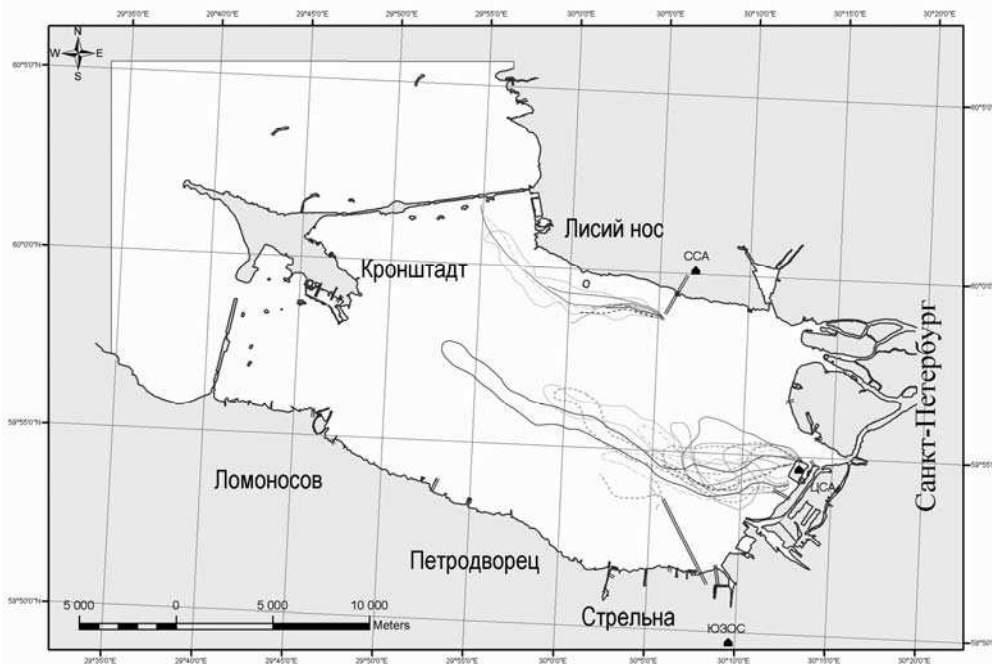


Рис. 4. Схема дешифрирования шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга по данным аэрокосмической съёмки

правило, они вытянуты в длину. Шлейфы ЦСА часто имеют изометричную форму, вытянутую в сторону морского канала. Иногда наблюдаются шлейфы вытянутой формы, при этом шлейф распространяется на запад вдоль северного края морского канала. Шлейфы ЦСА самые крупные, что соответствует объёму выпуска. Шлейфы ЮЗОС имеют самый малый размер среди других очистных сооружений. Они распространяются вдоль южного края морского канала в западном направлении. Таким образом, анализируя шлейфы очистных сооружений, была составлена заключительная схема распространения шлейфов (рис. 5).

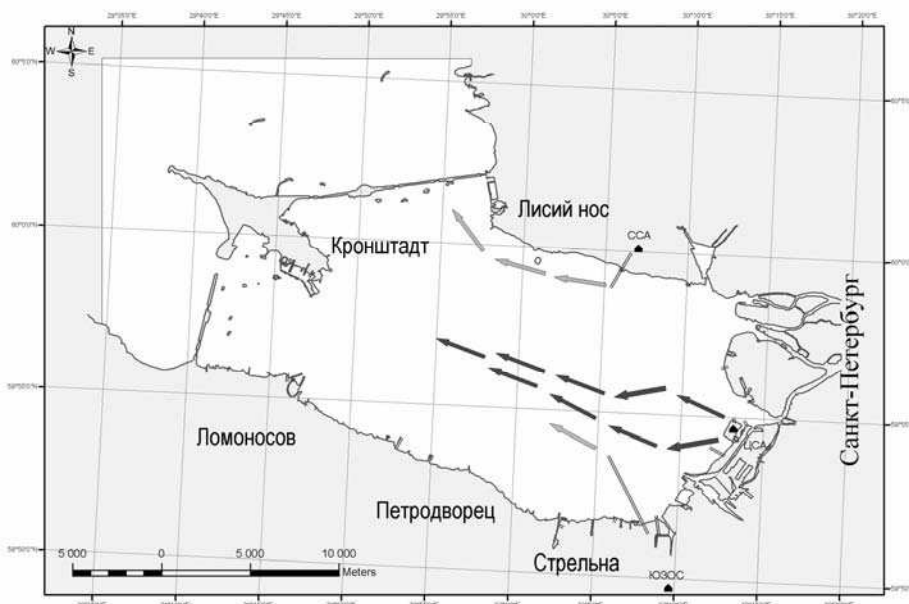


Рис. 5. Схема распространения шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга по данным аэрокосмической съёмки

Заключение

По результатам мониторинга шлейфов городских очистных сооружений Санкт-Петербурга аэрокосмическими средствами были сделаны следующие выводы:

1) Результаты космической и аэросъёмок позволяют осуществлять мониторинг шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга в Невской губе.

2) Шлейф ССА имеет сильно вытянутый характер, что указывает на высокие скорости течения. Шлейф вытянут вдоль северного берега Невской губы в большинстве метеорологических обстановок и прослеживается до о. Верперлуда, а иногда и до КЗС.

3) Шлейф ЦСА имеет большую площадь и распространяется главным образом вдоль северной границы морского канала, редко доходя до северо-восточного берега о. Котлин.

4) Шлейф ЮЗОС вытянут в западном направлении и имеет малые линейные размеры, достигая 5 км в длину и 200 м в ширину. Шлейф ЮЗОС распространяется вдоль южной границы морского канала на запад, не отклоняясь к южному берегу Невской губы.

5) Анализ распределения шлейфов очистных сооружений показывает, что их пространственное положение шлейфов в акватории в большинстве метеорологических обстановок консервативно и не оказывает влияния на экологическое состояние рекреационных зон на южном берегу Невской губы.

6) В некоторых случаях шлейф ЦСА может достигать водозаборных сооружений Кронштадта в Невской губе.

Выполненные исследования позволяют расширить работы по экологическому мониторингу Невской губы и перейти к комплексным исследованиям по долговременному мониторингу качества вод в восточной части Финского залива по данным космической съёмки. В настоящее время имеется возможность оценки качества вод по концентрации хлорофилла, мутности, температуре вод.

Представляется также целесообразным для расширения исследований по экологическому состоянию Невской губы провести авиационные съёмки с использованием принципиально новой аппаратуры для дистанционного зондирования воды: ультрафиолетовая камера, лидар, видеоспектрометр, гидрооптический лидар для картирования рельефа дна. Применение новой аппаратуры позволит на качественно новом уровне закартировать распространение шлейфов городских очистных сооружений, оценить экологическое состояние Невской губы.

По результатам исследований выявлено, что обширные области в южной части Невской губы могут иметь низкое качество вод по следующим причинам: скорость течений в этой части губы замедлена, малые глубины приводят к быстрому нагреву вод, по-видимому, имеет место привнос органических загрязнителей малыми реками.

Литература

1. Справочник по инфракрасной технике. М.: Мир, 1995. Т. 1. 606 с.
2. Шилин Б.В., Молодчинин И.А. Контроль состояния окружающей среды тепловой аэросъёмкой. М.: Недра, 1992. 78 с.