

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

© В. А. РУМЯНЦЕВ, С. А. КОНДРАТЬЕВ, Ш. Р. ПОЗДНЯКОВ,
В. А. РЯБЧЕНКО, С. Л. БАСОВА, М. В. ШМАКОВА

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ВОДНОЙ СИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО—РЕКА НЕВА—НЕВСКАЯ ГУБА— ВОСТОЧНАЯ ЧАСТЬ ФИНСКОГО ЗАЛИВА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Цель исследования — выявление основных факторов, оказывающих воздействие на качество воды в системе Ладожское озеро—р. Нева—Невская губа—восточная часть Финского залива в современных условиях. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

— Анализ формирования нагрузки на Ладожское озеро и выявление механизмов поступления загрязняющих веществ в исток Невы в зависимости от циркуляции и перемешивания озерных вод под воздействием гидрометеорологических факторов.

— Анализ условий переноса примесей, поступивших в русло р. Нева со стоком притоков и сбросов очистных сооружений, с учетом неоднородностей по сечению руслового потока.

— Анализ распространения шлейфов сточных вод на акватории Невской губы и восточной части Финского залива от водовыпусков очистных сооружений Санкт-Петербурга, выявление основных механизмов, определяющих изучаемые процессы.

— Анализ условий массопереноса и аккумуляции примесей в восточной части Финского залива под воздействием гидрометеорологических факторов и геохимических барьерных зон.

— Подготовка предложений по совершенствованию системы мониторинга изучаемой водной системы, ориентированного на решение задач обеспечения высоких показателей качества воды в Ладожском озере и р. Нева и минимизации негативного антропогенного воздействия на Невскую губу и восточную часть Финского залива.

При проведении исследования использовались материалы контактного мониторинга водных объектов, дистанционного зондирования и математического моделирования.

Схема водной системы Ладожское озеро—река Нева—Невская губа—восточная часть Финского залива представлена на рис. 1. Далее каждый объект рассматривается более подробно.

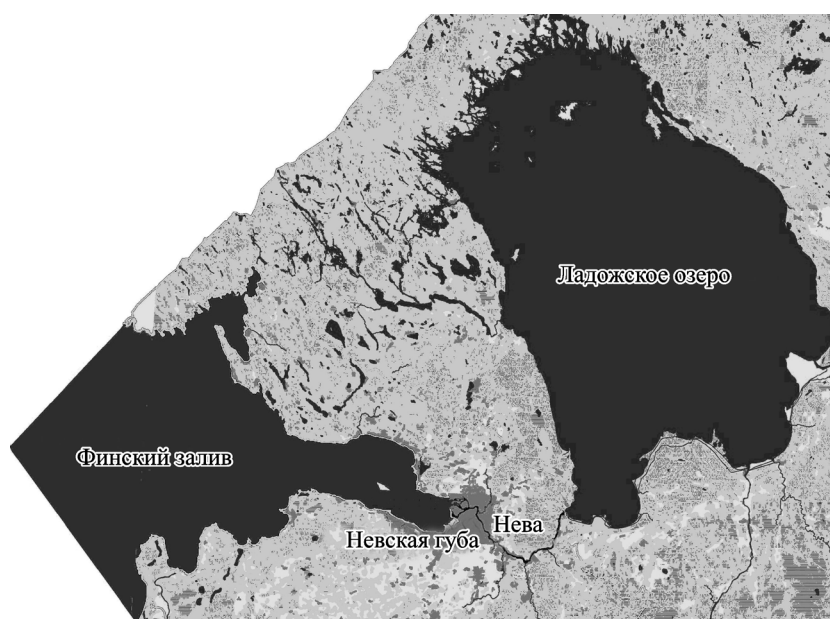


Рис. 1. Схема водной системы Ладожское озеро—р. Нева—Невская губа—восточная часть Финского залива.

Ладожское озеро площадью 17 870 км² с объемом водной массы 838 км³, средней и максимальной глубинами 47 и 230 м соответственно является крупнейшим озером Европы и десятым в мире по запасу пресной воды ([6], с. 16). Водосборный бассейн озера площадью около 280 000 км² расположен на территории трех государств: России (80 % общей площади), Финляндии (19.9 %) и Белоруссии (0.1 %). Время условного водообмена составляет ~11 лет. Водосборный бассейн Ладожского озера объединяет систему трех озер: оз. Сайма, сток которого происходит по р. Вуокса, оз. Онежского, дающего начало р. Свирь, и оз. Ильмень, из которого вытекает р. Волхов. Среднегодовое водный сток в Ладожское оз. составляет 71.3 км³ год⁻¹. На долю четырех притоков — рек Свирь, Вуокса, Волхов и Сясь, приходится около 89 % суммарного речного притока в озеро. Анализ многолетнего ряда наблюдений на притоках Ладожского озера показал, что в содержании биогенных элементов (в первую очередь общего фосфора $P_{общ}$) в воде рек, а следовательно поступлении их в озеро, произошли существенные изменения. Если в конце 1970-х—начале 1980-х гг. фосфорная нагрузка составляла 6000—7000 т год⁻¹, то начиная с 1983—1984 гг. отмечается снижение выноса фосфора в озеро, что связано с проведением водоохранных мероприятий (в частности, на Волховском алюминиевом заводе) и перепрофилированием Приозерского ЦБК. Дальнейшее снижение нагрузки на озеро в 1990-х гг. обусловлено сокращением промышленного и сельскохозяйственного производств и соответствующим снижением антропогенной нагрузки на поверхностные воды региона. В настоящее время с речным стоком в озеро поступает ~3000—5000 т P год⁻¹ в зависимости от водности года. Основной вклад в речной вынос фосфора в озеро вносят реки Волхов (40—64 %), Свирь (13—26 %), Вуокса (11—23 %). Поступление соединений азота в Ладожское оз. с водосборного бассейна в 9—16 раз превышает сток

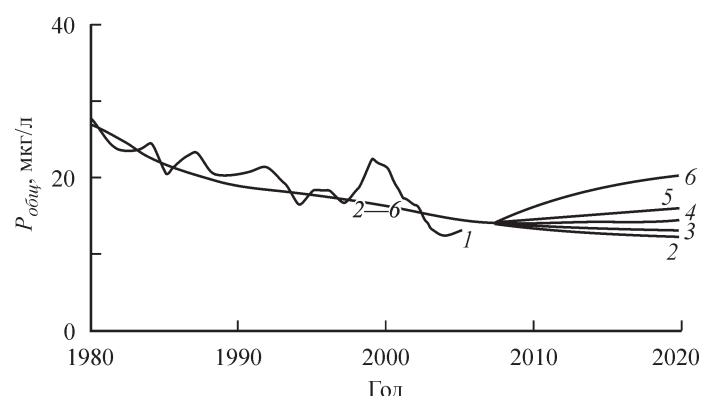


Рис. 2. Возможные изменения содержания $P_{общ}$ в воде Ладожского озера при изменении нагрузки от точечных источников на Российскую часть водосбора.

1 — измеренные концентрации, 2 — рассчитанные концентрации при условии сохранения нагрузки на уровне 2005 г., 3 — дву-, 4 — трех-, 5 — пяти-, 6 — десятикратное увеличение нагрузки.

фосфора. В отличие от фосфора какого-либо отчетливого тренда в сторону снижения выноса азота в озеро не прослеживается. В настоящее время с речным стоком в озеро поступает 55—65 тыс. т общего азота в год. Нагрузка на озера другими химическими веществами (металлами, нефтяными углеводородами, фенолами) также определяется их выносом со стоком рек Волхов, Свирь и Вуокса [6], с. 56).

Вклад прямых сбросов точечных источников в формирование нагрузки на Ладожское озеро в настоящее время составляет по различным компонентам от 1 до 3 % от значений общей нагрузки. Тем не менее сбросы Сясьского ЦБК вместе со стоком рек Волхов и Сясь формируют зону устойчивого загрязнения в Волховской губе. Сбросы ЦЗ Питкяранта привели к возникновению кризисной экологической ситуации в прилегающих шхерах северного побережья Ладожского озера.

В 2003—2010 гг. средняя за период открытой воды концентрация общего фосфора в воде Ладожского озера составляла ~ 12 мкг Р л⁻¹, что соответствует слабomezотрофному трофическому статусу. Оценка качества воды Ладожского озера с использованием индекса загрязненности вод (ИЗВ) позволяет сделать вывод о том, что основная водная масса Ладожского озера относится к категориям «очень чистая» (I класс качества, ИЗВ ≤ 0.3) и «чистая» (II класс качества, ИЗВ от 0.3 до 1.0). Максимальные значения ИЗВ (от 1.0 до 2.5) характеризуют устье р. Волхов как «умеренно загрязненное». По данным гидробиологических исследований 2007—2010 гг. трофический статус центральной части акватории озера в целом оценивается как слабomezотрофный, северной — как олиготрофный, западной — как мезотрофный.

С использованием математической модели фосфорного баланса Ладожского озера и его водосбора [3], с. 170) сделана прогностическая оценка возможного изменения содержания фосфора в Ладожском озере на перспективу до 2020 г. На рис. 2 приведены результаты расчетов концентрации $P_{общ}$ в озере с использованием реальных значений входных величин и параметров с 1980 по 2005 г., а затем для периода с 2006 по 2020 г. в предположении о сохранении внешней нагрузки $P_{общ}$ от точечных источников на уровне 2005 г. (615 т год⁻¹), ее дву-, трех-, пяти- и десятикратном увеличении. Показано, что при сохране-

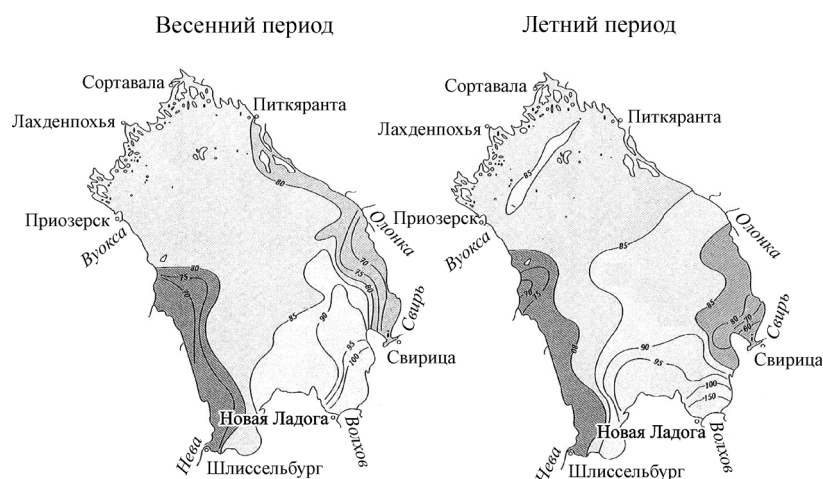


Рис. 3. Зоны распространения речных вод на акватории Ладожского озера в весенний и летний периоды.

нии на период до 2020 г. нагрузки $P_{общ}$ на Ладожское озеро от точечных источников на уровне 2005 г. (615 т год^{-1}), а также ее дву-, трех-, пяти- и десятикратном увеличении возможно возрастание значений концентраций $P_{общ}$ в воде озера с 11.8 до 12.7, 13.6, 15.5 и 20.2 мкг л^{-1} соответственно.

Качество воды в Шлиссельбургской бухте Ладожского озера в значительной степени определяет качество в р. Нева и на водозаборах ГУП Водоканал СПб. Существенное влияние на поступление в Шлиссельбургскую бухту загрязненных вод притоков оказывают циркуляционные течения в озере ([⁸], с. 89—92). Идентифицировать воды, поступающие в озеро со стоком различных притоков, можно по данным об электропроводности воды ([¹²], с. 183). В период ледостава течения в основном определяются режимом притока и стока рек, крупнейшей из которых является р. Свирь. Весной под воздействием ветра и термической стратификации система течений имеет сложный характер с тенденцией к формированию генеральной циклонической (направленной против часовой стрелки) циркуляции, способствующей поступлению вод р. Бурная (южного рукава Вуоксы) в Неву. Осеннее ветровое перемешивание приводит к гомотермии и открывает доступ водам из центральной части озера к истоку Невы. Зоны распространения речных вод на акватории Ладожского озера в разные сезоны года представлены на рис. 3, 4.

Результаты идентификации вод, попадающих в исток р. Невы, на основе измерений их электропроводности позволяют достаточно четко выделить три характерных периода ([¹²], с. 184):

— Зимний период (с января по март), характеризующийся наличием ледяного покрова на озере, препятствующего ветровому перемешиванию. Под влиянием антициклональной (направленной по часовой стрелке) циркуляции в озере, а также стока р. Невы создаются условия для транзитного поступления вод р. Волхов к истоку Невы.

— Период с апреля по август, когда под влиянием циклонального переноса озерных вод в исток Невы попадают воды р. Вуокса.

— Осенний период, характеризующийся интенсивным перемешиванием водной массы озера и преимущественным поступлением в исток Невы озерной

воды, а затем с начала ноября постепенно увеличивающимся влиянием волховских вод.

Также экспериментально установлено, что ветровое перемешивание и температурный режим активно воздействуют на водные массы Ладожского озера до глубин 18—20 м. В зоне с глубинами до 50 м значимы межгодовые вариации температурного режима. Начиная с глубин 50 м, ниже сезонного слоя скачка водная масса практически не подвержена резким климатическим (межгодовым) вариациям температуры и течений. Течения на этих глубинах невелики по величине и мало изменчивы по времени.

Река Нева — протока между Ладожским озером и Финским заливом длиной 74 км. Она берет начало в Шлиссельбургской бухте Ладожского озера и впадает в Невскую губу Финского залива, образуя сеть протоков, на которых расположен центр Санкт-Петербурга. В среднем сток р. Нева составляет $2500 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$, или $78.9 \text{ км}^3 \text{ год}^{-1}$. Отличительными ее особенностями являются обильное и равномерное водное питание в течение всего года с высокой степенью зарегулированности, а также сложный уровневый режим, не характерный для равнинных рек Северо-Запада России ([9], с. 5—15).

Внешняя нагрузка на Неву формируется на частном водосборе реки, имеющем площадь 5478 км^2 . 85 % площади занимают водосборы основных притоков — рек Мга (с площадью водосбора 750 км^2), Тосна (1639 км^2), Ижора (1005 км^2), Славянка (247 км^2), Охта (766 км^2) и Черная (258 км^2). В таблице проведены средние многолетние значения притока воды и поступления в Неву общего фосфора и общего азота, рассчитанные по данным СЗУГМС. Со стоком перечисленных притоков в Неву в среднем за год поступает $440.6 \text{ т } P_{\text{общ}}$ и $2287 \text{ т } N_{\text{общ}}$.

Источниками загрязнения Невы являются города Шлиссельбург, Отрадное и Кировск, а также пос. Морозова, Невская Дубровка, Новосаратовка ([10], с. 6—7). Крупными точечными источниками загрязнения Невы служат водовыпуски канализационных очистных сооружений (КОС) пос. Металлострой и Понтонный, принадлежащие ГУП Водоканал СПб. и сбрасывающие очищенные сточные воды непосредственно в русло в объемах соответственно 0.257 и $0.083 \text{ м}^3 \text{ сек}^{-1}$, что составляет $\sim 8.1 \text{ т } P \text{ год}^{-1}$ и $97.2 \text{ т } N \text{ год}^{-1}$ (Металлострой) и $3.6 \text{ т } P \text{ год}^{-1}$ и $44.4 \text{ т } N \text{ год}^{-1}$ (Понтонный).

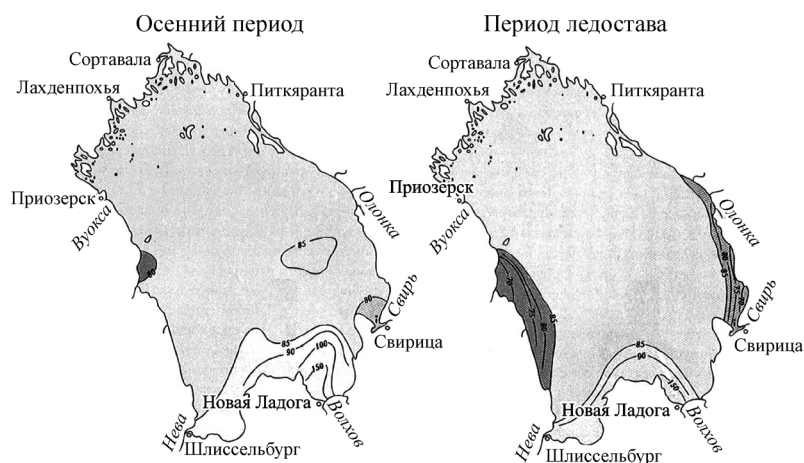


Рис. 4. Зоны распространения речных вод на акватории Ладожского озера в осенний и зимний периоды.

**Средние многолетние значения стока и выноса биогенных веществ
притоками р. Невы**

Река	Сток, км ³ год ⁻¹	$P_{общ}$, мкг л ⁻¹	$P_{общ}$, т год ⁻¹	$N_{общ}$, мкг л ⁻¹	$N_{общ}$, т год ⁻¹
Мга	0.18	754	135.7	2209	398
Тосна	0.34	129	43.9	1377	468
Ижора	0.41	297	121.8	1844	756
Славянка	0.07	844	59.1	1987	139
Охта	0.21	350	73.5	2041	429
Черная	0.07	94	6.6	1384	97

По данным 2007—2010 гг. водные массы Невы оцениваются как мезотрофные (по фитопланктону и бактериопланктону), на участках в районе впадения загрязненных притоков (Охта, Ижора) — слабоэвтрофные. Класс чистоты — «чистые» и «умеренно загрязненные». Ниже впадения притоков — «загрязненные» или «грязные» воды.

Гидродинамику руслового потока определяют разбавление и перенос примесей, поступающих из Ладожского озера и с водосборной территории. Для успешного решения многочисленных задач, связанных с расчетом и прогнозом распространения примеси в русле реки с учетом динамики во времени и неоднородности по сечению потока, необходимо привлечение достаточно совершенного математического аппарата. В настоящее время таким аппаратом может служить трехмерная гидродинамическая модель течений и переноса примесей в русле Невы ([¹²], с. 183), позволяющая рассчитывать скорости течения и концентрации примеси в любой точке живого сечения русла реки. С использованием модели выполнена серия имитационных расчетов распространения загрязнений, попавших в Неву из различных источников. Показано, что примесь, поступившая в русло Невы, распространяется вдоль берега в струйном режиме. Турбулентной диффузии оказывается недостаточно для достижения полного перемешивания по сечению.

Невская губа, имеющая длину 21 км, наибольшую ширину 15 км и площадь 400 км², простирается от устья Невы на востоке до комплекса защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений, расположенных по линии Лисий Нос—Кронштадт—Ломоносов на западе ([¹⁵], с. 16—19). Глубина губы — от 2.5 до 13 м с преобладающими значениями 3—5 м. Несмотря на принадлежность Невской губы к восточной части Финского залива, в настоящей работе она рассматривается как отдельный элемент водной системы, так как фактически является пресноводным водоемом со средней соленостью не более 0.07 ‰, расположенным в городской черте и отделенным от остальной части Финского залива дамбой КЗС. Время условного водообмена Невской губы составляет ~ 7 сут. Основная водная масса, поступившая в губу со стоком Невы и распространяющаяся в центральной части акватории, достаточно быстро достигает КЗС. При этом картина течений в прибрежных мелководных районах Невской губы и прежде всего в южной ее части не способствует выносу загрязненных городских сточных вод как в нормальном стоковом режиме, так и при наличии нагонных явлений. Аккумуляция загрязняющих веществ в донных отложениях прибрежных мелководных районов незначительна, что является следствием сильного воздействия волновых процессов и ветрового перемешивания.

Невская губа, принимающая как сток из Ладожского озера, так и сбросы очистных сооружений Санкт-Петербурга, характеризуется максимальным уровнем внешней нагрузки по сравнению с другими частями Финского залива. Наибольшие сбросы сточных вод формируются на водовыпусках Центральной станции аэрации (ЦСА), Северных очистных сооружений (ССА), Юго-западных очистных сооружений (ЮЗОС), КОС г. Петродворец (КОСП). В 2010 г. очистными сооружениями ГУП Водоканал СПб было сброшено $677.7 \text{ т Р год}^{-1}$ и $10\,003.0 \text{ т N год}^{-1}$. Если по биогенным элементам вклад Санкт-Петербурга в нагрузку на Невскую губу соизмерим с вкладом Ладожского озера, то поступление нефтепродуктов и металлов (железа, меди, свинца) со стоком р. Нева существенно превышает их сброс с муниципальных очистных сооружений. Поэтому воздействие Санкт-Петербурга негативно сказывается прежде всего на эвтрофировании Невской губы. Малые притоки Невской губы (р. Красненькая, Кикенка, Стрелка, Шингарка) сильно загрязнены и оказывают локальное негативное влияние на качество прибрежных вод в южной части акватории.

Воды акватории Невской губы в целом и отдельных ее районов характеризуются как «умеренно загрязненные». На значительной части акватории отмечены высокие уровни загрязнения легкоокисляемым органическим веществом (по величинам БПК₅), наиболее неблагоприятная ситуация сложилась в южном курортном районе. Различные районы акватории Невской губы в наибольшей степени были загрязнены медью, цинком и марганцем. По данным гидробиологических исследований 2007—2010 гг. водные массы Невской губы оцениваются как мезотрофные, в прибрежных участках по северному берегу — слабо-эвтрофные, по южному — эвтрофные и высокоэвтрофные.

В ходе проведения натурных исследований в Невской губе 1988—1990 гг. ([¹⁸], с. 172—181) показано, что характерной особенностью переноса примесей, поступивших на акваторию в местах водовыпусков очистных сооружений, является его струйный, меандрирующий характер, при относительно небольшой роли горизонтальной турбулентной диффузии. При этом большую часть времени года шлейфы сточных вод распространяются по поверхности, так как температура составляет $\sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Исключением является период зимнего охлаждения водной массы Невской губы до $1\text{—}3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, когда сточные воды, остывшие до $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ложатся на дно. Скорость и направление движения струй на акватории определяются скоростью и направлением течения и ветра. Естественно, что меандрирующие шлейфы сточных вод часто не попадают в фиксированные и достаточно редкие точки мониторинга, чем и объясняется большой разброс измеренных значений концентраций примеси в водной массе Невской губы.

Общую картину распространения шлейфов сточных вод в Невской губе иллюстрируют результаты моделирования, выполненного с использованием трехмерной гидродинамической модели ([³], с. 191—202), достаточно адекватно воспроизводящей указанные выше особенности переноса примеси по акватории. На рис. 5 приведены результаты расчетов превышения фоновых значений поверхностной концентрации $P_{\text{общ}}$ в Невской губе при установившемся режиме течений для условий летнего стоково-ветрового режима при расходе Невы $2540 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$ и западном ветре 3.5 мс^{-1} . Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы ([¹⁴], с. 48—57). Наиболее загрязненным является район у устья Невы между о-вом Белый и северной дамбой морского канала. Превышение прибрежных концентраций $P_{\text{общ}}$ над фоновыми значениями здесь составляет около 0.18 мг л^{-1} зимой и $0.08\text{—}0.10 \text{ мг л}^{-1}$ летом при любом ветре, за исключением южного, который способствует очищению южной части губы у

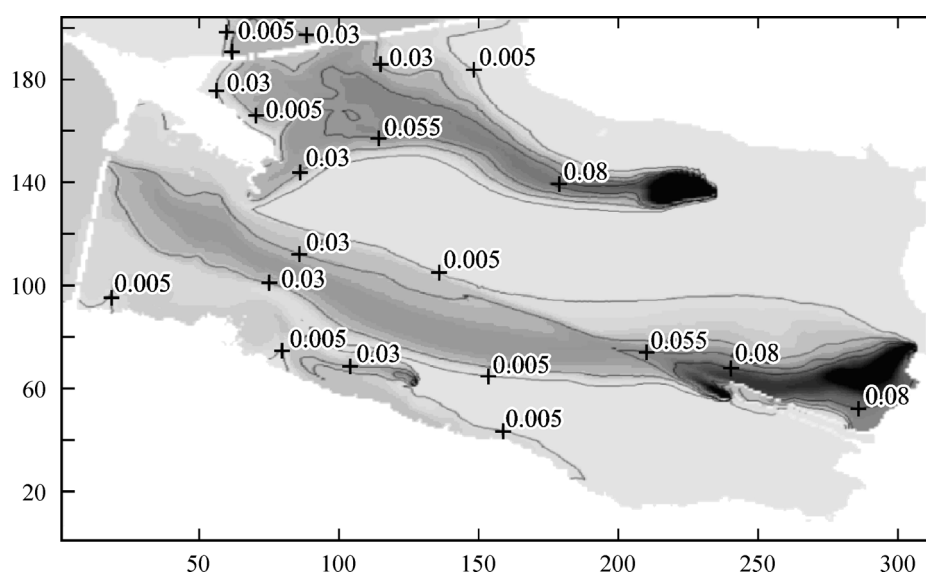


Рис. 5. Распределение превышения фонового значения поверхностной концентрации $P_{общ}$ (в $\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$) в Невской губе при установившемся режиме течений при расходе Невы $2540 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ и западном ветре $3.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (летний период).

Масштаб по осям: значения $\times 100 \text{ м}$.

северной дамбы морского канала. Дамба служит препятствием, ограничивающим проникновение шлейфов сточных вод ЦСА к южному побережью. У южного побережья наихудшая ситуация отмечается летом при западном ветре, который приводит к возникновению пятна повышенной концентрации. При этом юго-восточный район оказывается практически свободным от загрязнения сточными водами. Мелководная акватория у северного побережья Невской губы подвержена загрязнению сбросов ССА. Здесь неблагоприятные ситуации возникают при западном и северном ветрах. У северного и восточного побережий о-ва Котлин зоны повышенной концентрации $P_{общ}$ наблюдаются летом при восточном и южном ветрах, а также в зимнее время. Летом превышение концентрации над фоновыми значениями в наихудшей ситуации при западном ветре достигает $0.02 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, а зимой — $0.04 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$.

Результаты имитационного моделирования, выполненного с целью оценки воздействия возможного манипулирования открытием и закрытием водопропускных отверстий КЗС на качество воды в Невской губе, показали, что таким образом можно воздействовать на перераспределение потоков примеси только в непосредственной близости от дамбы на расстоянии не более 3—5 км.

Компания «Морской фасад» реализует на акватории Невской губы крупнейший в Европе проект по образованию и развитию территории в прибрежной зоне западной части Васильевского острова Санкт-Петербурга. На сайте компании (<http://www.mfspb.ru>) приведена весьма странная аргументация в пользу строительства: «...согласно научным изысканиям специализированных институтов, гидрологическая ситуация в Невской губе такова, что со временем здесь естественным путем образуется суша. Образование новой территории в этой части залива лишь ускоряет естественный ход вещей». Наиболее интенсивно намывные работы велись в 2006—2007 гг., при этом шлейфы взмученных вод распространялись далеко за пределы дамбы КЗС. Негативное воздействие

взмучивания заключалось в нарушении режима освещенности мелководных зон с соответствующими последствиями для гидробионтов. Кроме того, использование загрязненных грунтов для намывных работ приводило к ухудшению качества воды, прежде всего в Невской губе. В настоящее время экологическая обстановка несколько улучшилась, что объясняется прекращением интенсивных намывных работ и хорошей проточностью губы, что привело к увеличению прозрачности и снижению мутности воды. Тем не менее, по данным ФГУ Балттехмордирекция, локальные работы в Невской губе в 2006—2007 гг. обеспечили долговременное негативное воздействие на природную среду не только в самой губе, но и прилегающей части Финского залива за счет загрязнения донных осадков, являющихся потенциальным источником вторичного загрязнения водной толщи. Одним из последствий намывных работ в Невской губе явилась смена типа грунтов на нерестилищах рыб и их уничтожение, что, по данным ихтиологов, должно в долговременной перспективе неминуемо отразиться на возможности воспроизводства кормовых рыб в северной Балтике.

Восточная часть Финского залива — акватория, располагающаяся восточнее о-ва Гогланд, площадь водного зеркала — 12 500 км², объем водной массы — 276 км³. Максимальная глубина восточной части Финского залива достигает 60—65 м в районе о-ва Гогланд, в восточном направлении происходит уменьшение глубин ([¹⁵], с. 16—19).

Реки Луга и Нарва со средним многолетним стоком 103 м³ сек⁻¹ (3.24 км³ год⁻¹) и 367 м³ сек⁻¹ (11.56 км³ год⁻¹) соответственно — крупнейшие притоки восточной части Финского залива. По данным измерений 1999—2007 гг. со стоком Луги в залив поступает 105—548 т *P* год⁻¹ и 3079—8172 т *N* год⁻¹. Вынос биогенных веществ с российской части водосбора Нарвы оценивается в 297 т *P* год⁻¹ и 6570 т *N* год⁻¹ ([²], с. 3—4).

На режим солености водных масс сильное опресняющее влияние оказывает сток впадающих в него рек, прежде всего Невы. В направлении с востока на запад, по мере уменьшения влияния речного стока, соленость воды в заливе возрастает. Пресная вода распространяется в западном направлении по поверхности залива. Солоноватые воды в виде клина продвигаются в восточном направлении в придонной области.

Результаты гидрохимических исследований восточной части Финского залива в 2007—2010 гг. свидетельствуют об удовлетворительном качестве вод как мелководного, так и глубоководного районов. Однако в ряде районов сложилась менее благоприятная обстановка. Так, придонные воды некоторых участков Выборгского залива характеризуются как «загрязненные». Для многих участков акватории восточной части Финского залива характерно повышенное содержание меди. По гидробиологическим характеристикам мелководный район по данным 2007—2010 гг. имеет слабomezотрофный статус (по фитопланктону), курортная зона (Сестрорецк, Зеленогорск) — мезотрофный. Глубоководная часть также является слабomezотрофной, в том числе и Выборгский залив.

Картина течений в восточной части Финского залива формируется под влиянием таких процессов, как речной сток, ветровой дрейф, длинные волны штормового нагона и др. Все эти факторы очень изменчивы, и поэтому фактическая картина течений тоже сильно меняется как во времени, так и от места к месту. Тем не менее речной сток и разность плотности соленых и пресных вод являются более или менее постоянными. Поэтому можно говорить о некоторой

средней картине циркуляции вод в Финском заливе, включая и его восточную часть. Так, в Невской губе и мелководном районе, где преобладает влияние стока Невы, течения в среднем направлены на запад, а в северной части Копорской и Лужской губ и во внутреннем глубоководном районе — на северо-восток и север. Во внутренней части Копорской и Лужской губ средняя картина течений в основном определяется местным стоком рек Луга, Коваши, Систа и других, воды которых при впадении в море отклоняются на запад. Однако фактические течения в каждый момент времени, например при сильном ветре, могут сильно отличаться от средних по направлению и значительно превосходить их по скорости.

Из антропогенных факторов, локально влияющих на картину течений, наиболее значительным является КЗС, в результате строительства которых произошло перераспределение стока Невы, который сконцентрировался в Морских воротах к югу от Кронштадта и ощутимо сократился в северной части Невской губы, где перед плотиной возникла застойная зона шириной в несколько километров. При работающих судо- и водопропускных отверстиях дамбы перед ними возникают проточные участки со значительными скоростями стокового течения (до 20—40 см с⁻¹) в самих отверстиях, но малопроточные зоны перед глухими частями плотины сохраняются.

В зоне смешения речных и морских вод содержание взвеси и скорости ее седиментации значительно выше, чем в реке, особенно по морскую сторону от зоны смешения, что определяется комплексом физических, физико-химических и биологических условий. Осаждение взвеси здесь связано не только со снижением несущей силы потока при его впадении в море, но также и со сменой физико-химической обстановки, которую можно количественно выразить, прежде всего, через изменение солёности. В эстуарии Невы существуют зоны, в которых происходят интенсивные преобразования веществ-загрязнителей. Эти так называемые барьерные зоны, или маргинальные фильтры, могут удалять более 90 % загрязнения во взвеси и около 40 % в растворах ([7], с. 740—745). Эти фильтры многоступенчатые с последовательной сменой гравитационной, физико-химической и биологической частей. Особое значение это обстоятельство имеет для восточной части Финского залива, резко снижая вклад региона Санкт-Петербурга в загрязнение Финского залива и Балтийского моря в целом.

Значительное количество биогенных и органических веществ приносится в залив с водосборного бассейна Невы и от Санкт-Петербурга. Такого рода ситуация утвердила стереотип о том, что Санкт-Петербург является основным загрязнителем Балтийского моря и привела к устойчивому мнению ряда специалистов, главным образом зарубежных, что более всего замедлению процесса эвтрофирования Финского залива будет способствовать дополнительное сокращение сброса фосфора в составе сточных вод Санкт-Петербурга. Однако следует учесть, что Финский залив свободно сообщается с открытыми районами Балтийского моря. При этом восточная часть Финского залива представляет собой бесприливный эстуарий с двухслойным режимом течений, способствующих поступлению биогенных и загрязняющих веществ в залив как со стоком р. Нева, так и проникновению с придонными течениями далеко в глубь залива, вплоть до устья р. Нева, солёных, обогащённых биогенами вод из западных областей Финского залива и Балтийского моря. В Невской губе и восточной части Финского залива происходит аккумуляция значительной части веществ, поступающих с невским стоком и городских очистных сооружений. Часть взвешен-

ного материала оседает на первом гидродинамическом барьере на авандельте р. Нева и в подводных карьерах, а также в невском седиментационном бассейне. Основная же часть взвешенных наносов выносится из Невской губы и аккумуляруется в седиментационном бассейне Шепелевского плеса, т. е. главным образом в мелководном районе. В последние десятилетия сброс сточных вод с российской территории в Балтийское море существенно сократился, а эффективность очистных сооружений возросла. Так, если в 1985 г. очистные сооружения ГУП Водоканал СПб сбрасывали в Невскую губу 3502 т P год⁻¹ и 22 288 т N год⁻¹, то в 2010 г. сбросы сократились до 678 т P год⁻¹ и 10 003 т N год⁻¹. Однако несмотря на столь значительное уменьшение поступления биогенных элементов от очистных сооружений, это существенно не сказалось на продуктивности фитопланктона ни в одном из районов восточной части Финского залива. Также нет положительных тенденций ни в изменениях концентраций примеси, ни в распределении загрязняющих веществ в открытых водах восточной части Финского залива. Считается, что одной из возможных причин отсутствия позитивной реакции со стороны рассматриваемых экосистем является доминирование природных факторов, формирующих качество вод восточной части Финского залива по сравнению с антропогенным влиянием, имеющим для акватории восточной части Финского залива хотя и существенное, но все же локальное значение. Результаты расчетов по отечественной модели, учитывавшей как обмен с центральной Балтикой, так массообмен на границе вода—дно, показали, что восточная часть Финского залива в значительной степени импортирует фосфор из открытых вод. Снижение фосфорной нагрузки лишь усилит эту водоочистную функцию, а снижение поступления биогенов от Санкт-Петербургских очистных сооружений вряд ли улучшит качество вод в Финском заливе ([¹⁶], с. 12—18). Эффект сокращения содержания биогенов затронет только Невскую губу, где можно ожидать 20%-ного снижения первичной продукции. При этом уровень эвтрофирования в других частях неевского эстуария и в восточной части Финского залива в целом практически не изменится. Более существенные изменения, требующие длительного времени, могут произойти только в случае сокращения поступления биогенных элементов в открытую часть Финского залива и центральную часть Балтики ([²⁰], с. 225—237).

Подводя итоги выполненного анализа, можно выделить следующие основные факторы воздействия на качество воды системы Ладожское озеро—р. Нева—Невская губа—восточная часть Финского залива:

Ладожское озеро.

— Речной сток. На долю рек Свирь, Вуокса, Волхов и Сясь приходится около 90 % суммарного речного притока в озеро. Вынос растворенных и взвешенных примесей со стоком этих рек и определяет внешнюю нагрузку на озеро.

— Система плановых течений. В период ледостава течения определяются режимом притока и стока рек, крупнейшей из которых является Волхов. Весной формируется циклоническая циркуляция, способствующая поступлению вод Вуоксы в исток Невы. Осеннее ветровое перемешивание приводит к гомогенизации и открывает доступ в Неву водам из центральной части озера.

— Ветровое перемешивание и температурный режим. Прибрежная зона до глубин 18—20 м — зона интенсивного ветрового перемешивания и распространения вод притоков.

Река Нева.

— Поступление взвешенных и растворенных примесей из Ладожского озера.

— Внешняя нагрузка на Неву с ее собственного (частного) водосбора, зависящая от интенсивности точечных и рассредоточенных источников загрязнения и приуроченная к впадению рек Мга, Тосна, Ижора, Славянка и Охта.

— Гидродинамика течения в русле Невы, определяющая распространение примесей, поступающих с водосбора, в прибрежной зоне с минимальным влиянием на загрязнение водных масс в центральной части потока.

Невская губа.

— Поступление взвешенных и растворенных примесей из Ладожского озера и с частного водосбора Невы, внешняя нагрузка с водосборной площади.

— Гидрометеорологические условия, определяющие картину течений в Невской губе (стоковые течения в центральной части губы, слабопроточные зоны у берегов, ветровое перемешивание на мелководье, препятствующее аккумуляции наносов).

— Поступление сточных вод Санкт-Петербурга от водовыпусков очистных сооружений, распространяющихся затем на акватории губы в виде меандрирующих струй под воздействием стоковых течений, ветра, температурных условий и возможных нагонов.

— Проведение интенсивных работ по намыву новых территорий, приводящих к загрязнению вод во время их проведения и последующему накоплению токсичных веществ в толще донных осадков.

— Наличие комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений, изменившего картину течений в районе дамбы по сравнению с естественными условиями.

Восточная часть Финского залива.

— Поступление взвешенных и растворенных примесей из Невской губы, внешняя нагрузка с водосборной площади.

— Опресняющее влияние стока рек, прежде всего Невы, приводящее к возрастанию солености в направлении с востока на запад.

— Двухслойный режим течений, способствующий поступлению биогенных и загрязняющих веществ в залив как со стороны Невской губы и Санкт-Петербурга, так и из западных областей Финского залива и Балтийского моря с придонными течениями.

— Наличие в эстуарии Невы барьерной зоны, характеризующейся последовательной сменой гравитационной, физико-химической и биологической составляющих. Аккумуляция в мелководном районе значительной части взвешенных и растворенных веществ, поступающих с невским стоком и от городских очистных сооружений.

Выявленные особенности и закономерности формирования качества воды водной системы Ладожское озеро—р. Нева—Невская губа—восточная часть Финского залива определяют требования к совершенствованию мониторинга как системы наблюдений, оценки и прогноза ([¹¹], с. 1—6), ориентированного на решение задач обеспечения высоких показателей качества воды в Ладожском озере и р. Нева и минимизации негативного антропогенного воздействия на Невскую губу и восточную часть Финского залива.

Совершенствование системы наблюдений.

— **На притоках Ладожского озера.** Ежемесячные измерения расходов воды и отбор проб в замыкающих створах основных притоков, при этом следует обращать внимание на необходимость отбора проб воды на всех основных вертикалях, а не только на прибрежных.

— **На акватории Ладожского озера.** Ежемесячный отбор проб в репрезентативных точках с целью получения достоверной информации о гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристиках водной массы с учетом сезонной динамики и распространении примесей по акватории.

— **На р. Нева.** Ежемесячные измерения расходов воды и отбор проб по гидрохимическим показателям СЗУ Росгидромета в истоке Невы и в устьях рек Мга, Тосна, Ижора, Славянка и Охта. Весной, зимой и осенью — измерения концентраций примеси по длине реки в ее центральной части. Привлечение средств дистанционного зондирования и установка автоматизированных измерительных комплексов для оперативного предупреждения аварийных ситуаций на городских водозаборах.

— **На притоках Невской губы и восточной части Финского залива.** Ежемесячные измерения расходов воды и отбор проб на основных притоках: р. Луга, створ — 12 км ниже г. Кингисепп; р. Нарва, створ — ниже г. Ивангород; протока между Лахтинским Разливом и Невской губой; протока между Сестрорецким Разливом и Финским заливом; устья рек Красненькая, Шингарка, Стрелка.

— **На акватории Невской губы.** Интегрирование и взаимное дополнение сети государственного мониторинга СЗУ Росгидромета с программой по Неве (по крайней мере по железу общему, взвешенным и биогенным веществам) и сети наблюдений ГУП Водоканал СПб, согласование сроков отбора проб и состава анализируемых веществ.

— **На акватории восточной части Финского залива.** Восстановление объемов работ государственного мониторинга СЗУ Росгидромета. Интегрирование и взаимное дополнение сети государственного мониторинга СЗУ Росгидромета и сети наблюдений ГУП Водоканал СПб, согласование сроков отбора проб и состава анализируемых веществ. Контроль бактериального загрязнения. В донных отложениях седиментационных бассейнов Невской губы и восточной части Финского залива наблюдения за удержанием биогенных и загрязняющих веществ и их выносом из донных отложений.

Совершенствование методов оценки качества воды и экологического состояния рассматриваемой водной системы прежде всего заключается в следующем.

— Разработка региональных ПДК, учитывающих естественные геохимические аномалии с различным уровнем содержания природных соединений.

— Разработка и совершенствование нормативов на загрязнение водных объектов и эвтрофирование, а также экологически допустимых уровней воздействия (ЭДУ).

— Разработка и совершенствование нормативов на загрязнение донных отложений.

— Разработка экологических нормативов (НДВ) для основных звеньев рассматриваемой водной системы.

Совершенствование методов прогноза с использованием следующих математических моделей.

— Модель формирования стока и выноса примесей с водосборов Северо-Запада России ([⁵], с. 99—104; [⁴], с. 42—52).

— Гидродинамическая модель течений и переноса примеси в Ладожском озере, модель экосистемы Ладожского озера ([¹], с. 57, 212).

— Трехмерная гидродинамическая модель течений и переноса примеси в р. Нева ([¹²], с. 182—184).

- Трехмерная гидродинамическая модель течений и переноса примеси в Невской губе и восточной части Финского залива ([¹⁴], с. 48—57).
- Модель экосистемы Балтийского моря ([¹³], с. 116—117).
- Модель кислородного режима водоема ([¹⁷], с. 331—340).
- Модель формирования внутренней нагрузки ([¹⁹], с. 295—305).

Список литературы

- [1] Астраханцев Г. П., Менишуткин В. В., Петрова Н. А., Руховец Л. А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. СПб.: Наука, 2002. 363 с.
- [2] Кондратьев С. А. Оценка биогенной нагрузки на Финский залив Балтийского моря с российской части водосбора // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 1. С. 1—9.
- [3] Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.
- [4] Кондратьев С. А., Басова С. Л., Еришова А. А., Ефремова Л. В., Маркова Е. Г., Шмакова М. В. Метод оценки биогенной нагрузки на водные объекты Северо-Запада России // Изв. РГО. 2009. Т. 14. Вып. 2. С. 42—52.
- [5] Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера) // Тр. XII съезда РГО. СПб.: Наука, 2005. Т. 6. С. 99—104.
- [6] Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. 327 с.
- [7] Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735—747.
- [8] Науменко М. А. Горизонтальные градиенты температуры в термической фронтальной зоне крупного пресноводного озера // Метеорология и гидрология. 1989. № 6. С. 89—92.
- [9] Нежиковский Р. А. Река Нева и Невская губа. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 110 с.
- [10] Нежиковский Р. А. Вопросы формирования качества воды реки Невы и Невской губы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 107 с.
- [11] Положение об осуществлении государственного мониторинга водных объектов. Утверждено постановлением Правительства РФ от 10.04.2007 № 219. 6 с.
- [12] Румянцев В. А., Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Еришова А. Л., Поздняков Ш. Р., Крючков А. М. Формирование качества воды в р. Неве // Материалы Междунар. экологического форума «День Балтийского моря». СПб., 2010. С. 182—184.
- [13] Рябченко В. А., Карлин Л. Н., Неелов И. А., Еремина Т. Р., Савчук О. П., Ванкевич Р. Е., Исаев А. В., Кондратьев С. А., Молчанов М. С. Модельные оценки изменений экосистемы Балтийского моря при планируемых снижениях биогенной нагрузки с учетом возможных изменений климата // Материалы Междунар. экологического форума «День Балтийского моря». СПб., 2011. С. 116—117.
- [14] Рябченко В. А., Коноплев В. Н., Кондратьев С. А., Поздняков Ш. Р., Лыскова У. С. Оценка изменения качества воды Невской губы после введения в эксплуатацию юго-западных очистных сооружений Санкт-Петербурга (по данным математического моделирования) // Изв. РГО. 2006. Т. 138. Вып. 5. С. 48—57.
- [15] Экосистема эстуария Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы / Под ред. А. Ф. Алимова, С. М. Голубкова. СПб.; М.: Изд-во КМК, 2008. 477 с.
- [16] Eremina T. R., Savchuk O. P., Isaev A. V., Neelov I. A. The Modeling of Ecological Effects of Nutrients Reduction in the Eastern Part of the Gulf of Finland // Environmental research, engineering and management. 2006. N 4(48). P. 12—18.
- [17] Golosov S., Maher O. A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovenova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes // Oecologia. 2007. Vol. 151. P. 331—340.
- [18] Gribin S., Assaul V., Andreev V., Kondratyev S. Problems of modeling the sewage discharge in shallow water areas: experimental and theoretical study // Proc. XVIII Int. Oceanographic Conf. St. Petersburg, 1994. P. 172—181.

- [19] Ignatieva N. V. Nutrient exchanges across the sediment-water interface in the eastern Gulf of Finland // *Boreal Environment Research*. 1999. Vol. 4. P. 295—305.
- [20] Savchuk O. P., Eremina T. R., Isaev A. V., Neelov I. A. Response of the Eastern Gulf of Finland eutrophication to nutrient load reduction scenarios // *Hydrobiologia*. 2009. Vol. 629(1). P. 225—237.

Санкт-Петербург

Поступило в редакцию
20 октября 2011 г.

Изв. РГО. 2012. Т. 144. Вып. 2

© А. В. ЛИТВИНЕНКО, М. С. БОГДАНОВА, В. А. КАРПЕЧКО, И. А. ЛИТВИНОВА

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ БАССЕЙНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Онежское озеро — один из крупнейших водоемов нашей страны и второй по площади пресноводный водоем Европы. Озеро и его приток Илекса — Водла — являются верхним звеном самой большой европейской озерно-речной системы Невы. Озеро дренирует значительную территорию, различную по геологическому строению, орографии и гидрографии. В естественном состоянии озеро принимало сток с водосборного бассейна площадью 53 100 км². Площадь самого водоема составляла 9720 км². После строительства в 1953 г. Верхне-Свирской ГЭС озеро стало водохранилищем с водосборной площадью 57 300 км² и площадью зеркала 9840 км² [3]. Около 70 % территории бассейна относится к Республике Карелия, остальная часть расположена в Ленинградской, Вологодской и Архангельской областях.

Гидрографическую сеть бассейна озера образуют 6765 рек общей длиной 22 741 км и 9516 озер общей площадью 13 441 км². Максимальное количество водотоков (95 %) составляют малые, длиной менее 10 км [6], и лишь 7 рек имеют протяженность более 100 км (табл. 1). Коэффициент густоты речной сети равен 0.44 км/км².

К притокам Онежского озера относятся 1152 реки, из которых лишь 52 имеют длину более 10 км [6]. Более половины бассейна занято водосборами трех главных его притоков: рек Шуи (площадь водосбора 10.1 тыс. км²), Суны (7.7 тыс. км²), Водлы (13.7 тыс. км²). Вытекает из озера лишь одна река — Свирь, являющаяся крупнейшим притоком Ладожского озера.

Большую часть водоемов на водосборе Онежского озера (9144, или 96 %) составляют озера площадью менее 1 км², однако по суммарной площади акваторий их доля не превышает 5 % (671.7 км²) [6]. Наиболее крупные озера приведены в табл. 2.

Озерность бассейнов рек в северной части водосбора Онежского озера изменяется от 3 до 18 %, в южной — от 1 до 3 %; заболоченность — 5—20 %, а в бассейне р. Водлы достигает 24 % [7]. Распределение запасов озерных вод по территории показано в табл. 3.