

МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ КАК ИНСТРУМЕНТ
ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОД НЕВСКОЙ ГУБЫ

© 2018 г. Ю. Н. Сергеев^{1,*}, А. В. Денисенко^{1,**},
В. В. Дмитриев^{1,***}, В. П. Кулеш^{1,****}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: unsergeev36@gmail.com

**e-mail: nastya.denisenko.94@mail.ru

***e-mail: vasilij-dmitriev@rambler.ru

****e-mail: vpkulesh@gmail.com

В статье приводятся результаты изучения пространственно-временной изменчивости качества вод Невской губы Финского залива Балтийского моря. Оценка качества вод в период 1988–2016 гг. выполнена на модели распознавания образов, включающей обучающую и распознающую системы. Распознавание проведено по 14 характеристикам, объединенным в 4 частных и 2 интегральных показателя. Установлены причинно-следственные связи между качеством воды и определяющими его факторами. Показано, что качество вод губы в большей степени определяется показателями, традиционно используемыми для выявления продуктивности водоема и, в меньшей степени, — поступлением антропогенных поллютантов. Химический состав воды Ладожского озера является для Невской губы фоном, на который накладываются стоки биогенных веществ со станций аэрации. Введенная в 2005 г. технология глубокой очистки стоков существенно улучшила экологическую обстановку в губе. Главным фактором, сдерживающим антропогенное эвтрофирование, и одновременно ухудшающим качество воды, являются гидротехнические работы на мелководных акваториях. Генерируемая ими высокая мутность воды лимитирует первичную продукцию и является основным фактором, препятствующим цветению воды в Невской губе. В статье приводятся 6 графиков временной и 15 карт пространственной изменчивости качества воды в губе по результатам интегральной оценки. За 28 лет качество воды изменяется от “чистой” с 1988–2003 гг. до “умеренно-загрязненной” в остальные годы. В пространстве качество воды изменяется от “очень чистой” в приустьевых районах губы до “загрязненной” на всей акватории в годы строительства порта “Морской фасад” Санкт-Петербурга.

Ключевые слова: Невская губа, качество воды, модель распознавания образов, интегральные показатели, карты качества воды

DOI: 10.1134/S0869607118050075

Введение. Экологические проблемы системы “Ладожское озеро – река Нева-Невская губа”. Экологическая обстановка в Невской губе, водотоках города и Ладожском озере в XX–XXI веках изучалась многими исследователями, научными и производственными организациями [12]. С 1978 г. в Невской губе на постоянной сети станций осуществляется экологический мониторинг [7]. Созданы базы данных по экологии и источникам загрязнения реки Невы и Невской губы [3, 11]. Разрабатываются ГИС-системы для оценки экологической обстановки на акватории восточной части Финского залива и Невской губы [18].

Невская губа — эстуарий реки Невы, превратившийся после завершения строительства Комплекса защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений в проточное водохранилище с регулируемым стоком на 2 судопропускных и 6 водопропускных сооружениях. Расход воды, поступающей в губу через многочисленные рукава дельты р. Невы, зависит от климата и погоды на площади водосбора Ладожского озера. Наряду с важностью КЗС для развития Санкт-Петербурга, его строительство привело к ряду негативных последствий. Нарушился природный энерго-массообмен между губой и восточной частью Финского залива. Частично изменился режим сточных течений в губе и, главное, режим и скорости мощных градиентных компенсационных течений, возникающих при наводнениях и выполняющих роль своеобразных “дворников”, выносящих взмученные загрязненные грунты за пределы губы [14].

“В начале 1970-х годов в Ленинграде (Санкт-Петербурге) практически отсутствовали очистные сооружения и централизованная система канализационных коллекторов. Сброс неочищенных сточных вод в водные объекты города составлял 3.2 млн. м³/сутки. Протяженность коллекторов — 130 км. На тот период город Ленинград считался самым крупным источником загрязнения на водосборном бассейне Балтийского моря” [22].

В 1978 г. была введена в эксплуатацию первая очередь Центральной станции аэрации (ЦСА) с биологической очисткой хозяйственно-бытовых стоков, а в 1985 г. ее вторая очередь. Это позволило повысить мощность ЦСА до 1.5 млн. м³/сутки. В 1987 г. заработала первая очередь Серверной станции аэрации (ССА). Отсутствовала технология удаления биогенных элементов [23]. Санкт-Петербург, по мнению зарубежных экологов, с 1990 г. является “единственным крупным источником поступления фосфора и азота в Финский залив и Балтийское море” [22], а процессы седиментации тяжелых металлов в Невской губе превратили ее в “техногенную лагуну” [24].

В 2004 г. ГУП “Водоканал Санкт-Петербурга” начал внедрение на ЦСА и ССА новых технологий биохимической очистки хозяйственно-бытовых стоков с глубоким удалением биогенных веществ. Введение в эксплуатацию в 2005 г. Юго-Западных очистных сооружений (ЮЗОС) дало возможность довести объем глубоко очищенных стоков города до 85% [13, 15].

На протяжении почти трех столетий Санкт-Петербург (Ленинград) обходился без очистки промышленно-бытовых стоков, сбрасываемых в р. Неву и Невскую губу, полагаясь лишь на их самоочищающую способность. Между тем на протяжении многих лет происходило накопление в донных отложениях антропогенных поллютантов, органических и минеральных веществ. Взмучивание глинистых техногенных осадков и перемещение в ходе гидротехнических работ существенно ухудшают качество вод губы.

Крупнейшее в Европе Ладожское озеро — начальное звено рассматриваемой водной системы [10]. В начале 1960-х годов воды Ладожского озера относились к олиготрофному классу. Развитие промышленности и сельского хозяйства в 1970-е—начале 1980-х годов изменило трофический статус озера до мезотрофного. В начале 1990-х годов в связи с переходом от плановой к рыночной экономике произошло снижение антропогенной нагрузки, и воды озера стали олиготрофными. В начале XXI века в стране происходило постепенное восстановление экономики, и воды озера, особенно в мелководной Шлиссельбургской губе, вновь стали мезотрофными [16]. Очевидно, что трофический статус и качество вод Ладоги являются фоном, на который в р. Неве и Невской губе накладываются эмиссионные и ландшафтно-деструкционные антропогенные воздействия Санкт-Петербурга.

Таблица 1. Классификационные признаки и алфавит классов, принятые для оценки трофического статуса и качества вод Невской губы

Классификационные признаки качества воды		Классы трофности, качества воды и градации их признаков			
		Олиготрофный (1) Очень чистые (1)	Мезотрофный (2) Чистые (2)	Мезотрофно-эвтрофный (3) Умеренно-загрязненные (3)	Эвтрофный (4) Загрязненные (4)
Гидрофизич. характеристики	Прозрачность воды, м	3–2	2–1.5	1.5–1	1–0
Гидробиологич. характеристики	Биомасса фитопланктона, мг/л	0.1–1	1–3	3–7	7–15
	Зоопланктон, мг/л	0–1	1–2	2–3.5	3.5–5.0
	Хлорофилл “а”, мкг/л	0.1–2	2–9	9–12	12–15
Гидрохимич. характеристики и антропогенные поллютанты	Концентрация аммонийного азота (NH ₄), мг/л	0.01–0.02	0.02–0.06	0.06–0.3	0.3–1
	Концентрация нитритного азота (NO ₂), мгN/л	0.001–0.02	0.02–0.03	0.03–0.06	0.06–0.1
	Концентрация нитратного азота (NO ₃), мгN/л	0.01–0.02	0.02–0.1	0.1–0.3	0.3–1.0
	Концентрация минерального фосфора (PO ₄), мкг/л	5–20	20–50	50–80	80–100
	Концентрация БПК ₅ , мгO/л	0–3.3	3.3–5.5	5.5–7.7	7.7–10
	Концентрация нефтепродуктов, мг/л	0–0.01	0.01–0.05	0.05–0.3	0.3–0.6
	Концентрация свинца, мг/л	0–0.001	0.001–0.006	0.006–0.01	0.01–0.03
	Концентрация кадмия, мг/л	0–0.0001	0.0001–0.001	0.001–0.003	0.003–0.005
	Концентрация меди, мг/л	0–0.0001	0.0001–0.001	0.001–0.03	0.03–0.5
	Концентрация СПАВ, мг/л	0–0.001	0.001–0.01	0.01–0.1	0.1–1

Методы исследования. Модель распознавания качества вод Невской губы. Термином “качество воды” обозначается сочетание химического и биологического составов и физических свойств воды, определяющих ее пригодность для конкретных видов водопользования [13]. Биоцентризм добавляет в оценку и методы контроля качества оценку пригодности воды для использования в качестве среды жизни организмами-гидробионтами. Поскольку с ростом трофического статуса водоема, как правило, ухудшается качество его вод, многими исследователями категория трофности рассматривается

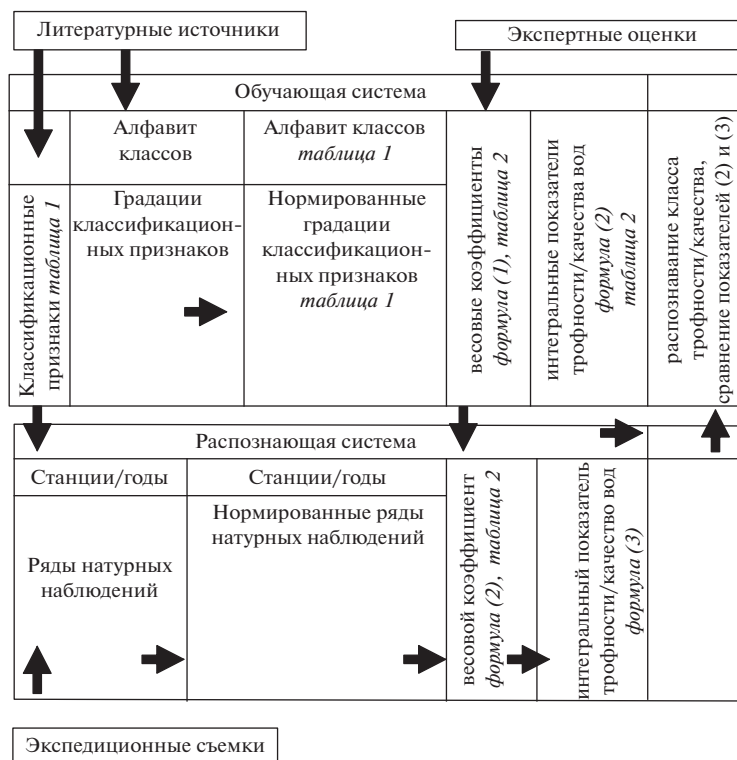


Рис. 1. Схема распознавания качества вод Невской губы (стрелками указаны потоки информации).

как подмножество категории качества воды. Такой подход иллюстрирует табл. 1, в которой качество воды определяется совокупностью показателей, использующихся для оценки продуктивности, химического состава воды и ее загрязнения.

Дефицит и неопределенность информации, связанные с внутригодовой изменчивостью экологических характеристик и большей дискретностью экологических съемок, могут быть частично преодолены при использовании модели распознавания, основанной на методе сводных показателей [6, 17, 20]. В соответствии с общей теорией распознавания образов, модель распознавания качества вод Невской губы состоит из обучающей и распознающей систем (рис. 1) [1, 17].

Алгоритм обучающей системы предусматривает:

1) Выбор алфавита классов качества воды; 2) выбор совокупности признаков, характеризующих принятый алфавит классов; 3) выбор совокупности градаций для каждого признака. Выбор признаков и их градации определяется, с одной стороны, составом мониторинга вод Невской губы, а с другой – существованием однопризнаковых классификаций трофности и качества воды.

4) Формирование матрицы градаций классификационных признаков.

5) Формирование матрицы нормированных градаций классификационных признаков. Процедура нормирования осуществляется с помощью функций [4, 5].

Таблица 2. Весовые коэффициенты, выбранные для каждой группы признаков

Группы признаков	Весовые коэффициенты
Гидрофизические	$P_{\text{проз}} = 1$
Гидробиологические	$P_{\text{фит}} = P_{\text{хлор}} = 0.4; P_{\text{зоо}} = 0.2$
Гидрохимические и антропогенные загрязнители	$P_{\text{NO}_2} = P_{\text{NO}_3} = 0.1; P_{\text{БПК}_5} = 0.2; P_{\text{NO}_4} = 0.4; P_{\text{NH}_4} = 0.2;$ $P_{\text{нефт}} = 0.15; P_{\text{спав}} = 0.2; P_{\text{Cu}} = 0.15; P_{\text{Cd}} = 0.25; P_{\text{Pb}} = 0.25$

6) Оценка значимости отдельных классификационных признаков и их групп в формировании трофического статуса и качества вод:

$$P = P_1, P_2, \dots, P_n, \dots, P_N; \quad \sum_{n=1}^N P_n = 1, \quad (1)$$

где P_n – весовой коэффициент некоторого признака, n – его текущий номер; $N = 14$ – общее число коэффициентов.

Веса признаков и их групп определяются методом экспертных оценок с учетом региональных особенностей Невской губы (см. табл. 2).

7) Вычисление эталонных частных и интегральных показателей трофности и качества вод:

$$D_{(S,P)} = \sum_{n=1}^N S^{(n)} P_n, \quad (2)$$

где N – число признаков, $S^{(n)}$ – нормированные градации признаков, P_n – весовые коэффициенты признаков.

Алгоритм распознающей системы включает в себя:

1) Вычисление среднегодовых значений характеристик экологического мониторинга по множеству станций (для оценки межгодовой изменчивости показателей) и для отдельных станций (для изучения пространственной изменчивости показателей в конкретном году).

2) Формирование матриц осредненных значений характеристики. Временная изменчивость качества вод Невской губы изучалась по 28-летнему временному ряду наблюдений, пространственная – по 22 стандартным станциям наблюдений.

3) Формирование матриц нормированных осредненных значений характеристик.

4) Частные (гидрофизический, гидрохимический, гидробиологический, загрязняющий) показатели и комплексные (Т-единица, К-единица) показатели трофности и качества вод Невской губы рассчитываются по формуле:

$$Q_{(q,P)} = \sum_{n=1}^N q^{(n)} P_n, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

5) Распознавание трофического статуса и качества воды в конкретный год или в районе конкретной станции состоит в установлении принадлежности значения сводного показателя (2) к одному из классов обучающей системы, характеризующихся значениями показателя (3).

Результаты и их обсуждение. Временная изменчивость показателей качества воды. Оценка изменчивости качества вод Невской губы проводилась для временного интервала 1988–2016 гг., охватывающего насыщенный событиями всероссийского и регио-

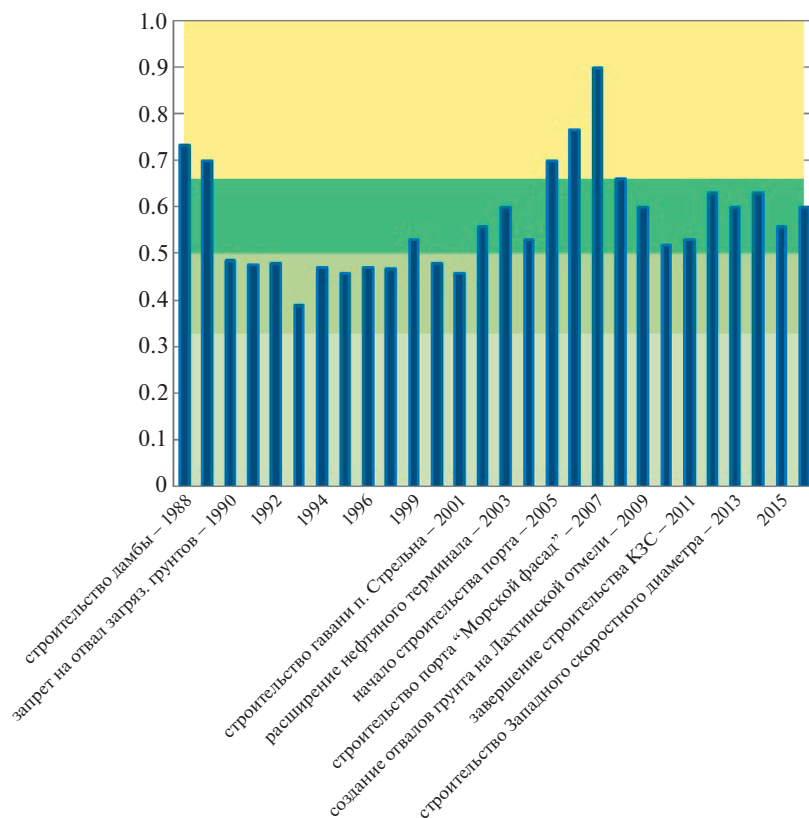


Рис. 2. Временная изменчивость гидрофизического признака за период с 1988 по 2016 г. Легенда: ■ – загрязненные, ■ – умеренно-загрязненные, ■ – чистые, ■ – очень чистые.

нального масштабов период перехода от плановой к рыночной экономике (рис. 2). Эти события зеркально отражались на состоянии экосистемы губы и Финского залива, вызывая законное беспокойство правительств прибалтийских государств, особенно Финляндии и Швеции [15].

Причинно-следственные связи между этими событиями и качеством воды Невской губы иллюстрирует временная изменчивость частных и единых показателей.

Частный гидрофизический показатель. Связь между интенсивностью гидротехнических работ в губе и прозрачностью воды убедительно иллюстрирует рис. 2. В годы рукотворной экономической катастрофы в стране (1990–2000 гг.) мутность воды в губе определялась главным образом природными факторами. Гидротехнические работы не проводились. Качество вод по показателям прозрачности классифицировалось как чистая. В годы с интенсивными гидротехническими работами (1988–1989, 2005–2016 гг.) качество вод ухудшалось до умеренно-загрязненной и даже загрязненной.

Частный гидробиологический показатель. Связанное с отсутствием финансирования прекращение работ по сооружению КЗС немедленно сказалось на производственных

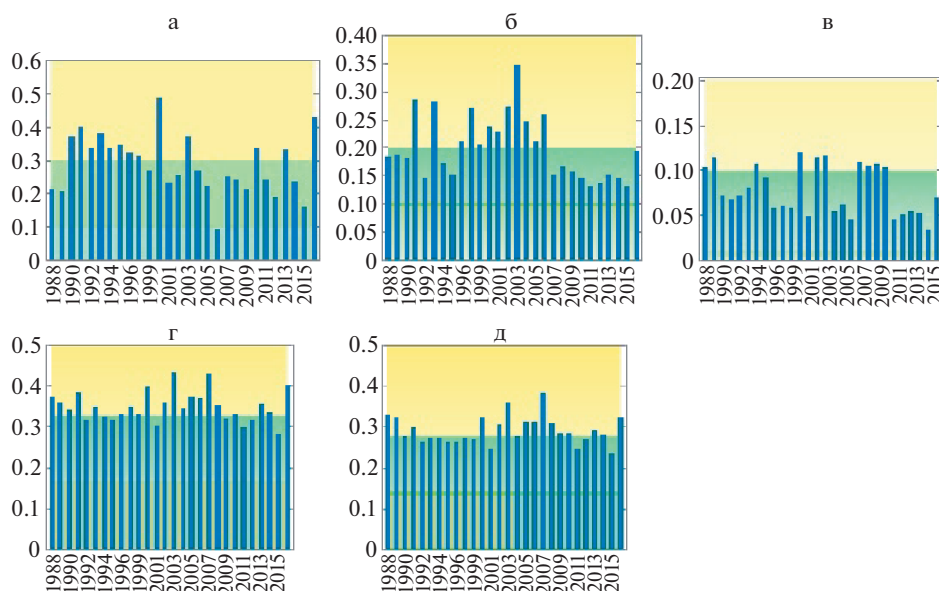


Рис. 3. Временная изменчивость показателей качества. Частные показатели: а) гидробиологический, б) гидрохимический, в) поллютантный. Интегральные показатели: г) Т-единый показатель, д) К-единый показатель. Легенда к рис. 3 а, б, в. ■ — мезотрофно-эвтрофный/умеренно-загрязненный, ■ — мезотрофные/чистые, ■ — олиготрофные/очень чистые, ■ — частный показатель. Легенда к рис. 3 г, д. ■ — умеренно-загрязненные, ■ — чистые, ■ — очень чистые, ■ — единый показатель.

возможностях экосистемы губы (рис. 3а). Качество вод губы по гидробиологическому показателю изменилось с чистого до умеренно-загрязненного.

Рост объемов гидротехнических работ в 2000-е годы, особенно при строительстве пассажирского порта “Морской фасад”, существенно повысил мутность вод губы и понизил продукционную способность ее экосистемы. Качество вод по этому признаку в 2006 г. изменилось до очень чистого класса.

Частный гидрохимический показатель вод Невской губы формируется под воздействием трех составляющих: стока биогенных веществ с бассейна Ладожского озера, сброса хозяйственно-бытовых вод города в рукава и каналы дельты реки Невы и сброса не полностью очищенных вод со станций аэрации. В 1990-е годы олиготрофные (очень чистые) ладожские воды смешивались в Неве с бытовыми стоками, а в губе — со стоками ЦСА и ССА, не прошедшими глубокую очистку. В результате, по гидрохимическому показателю, в губе до конца 1990-х годов формировались мезотрофные (чистые) воды (рис. 3б). Постепенное восстановление сельскохозяйственного производства после экономического кризиса 1998 г. повысило статус вод Ладоги до мезотрофного (чистого) класса. Соответственно качество вод Невской губы стало умеренно-загрязненным. Резкое улучшение качества воды произошло здесь после 2006 г., когда заработали Юго-Западные очистные сооружения и на всех трех станциях аэрации была введена в действие технология глубокой очистки сточных вод от биогенных веществ.

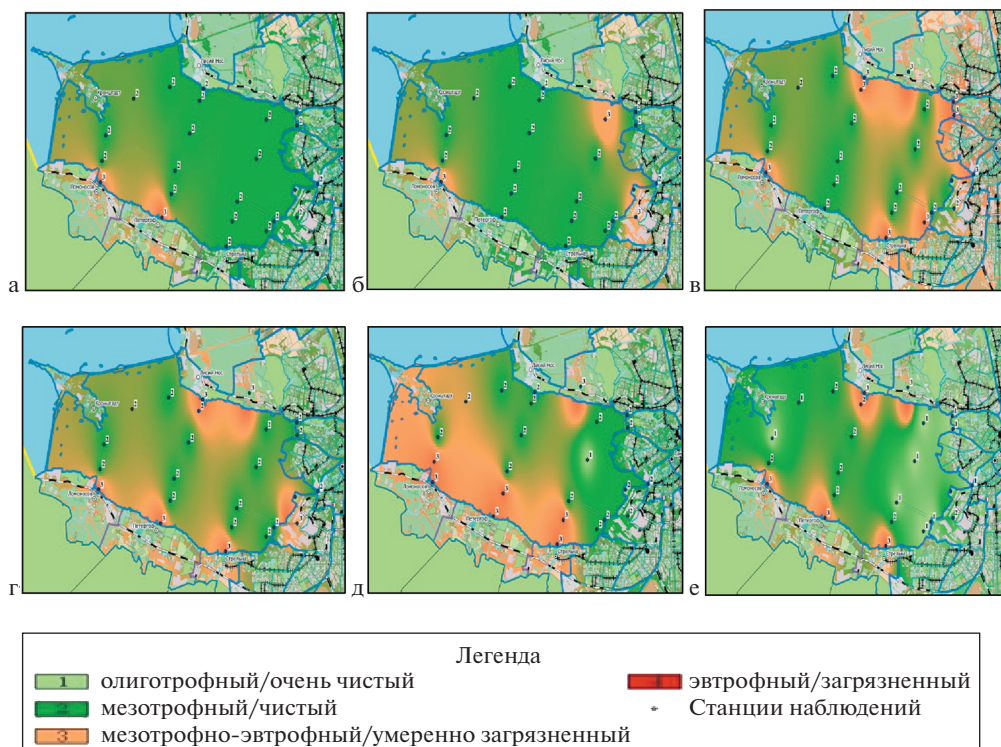


Рис. 4. Пространственная изменчивость качества вод Невской губы по гидробиологическому показателю: а – 1998, б – 2007, в – 2014 и по гидрохимическому показателю: г – 1998, д – 2007, е – 2014.

Частный поллютантный показатель формируется под воздействием таких факторов, как производственная активность промышленности и транспорта, технология очистки выбросов и сбросов на локальных очистных сооружениях, рост автомобильного парка, взмучивание загрязнений со дна губы и т.д. Множественность, разнородность и разномасштабность этих факторов не позволяют установить их связь с временной изменчивостью качества вод Невской губы (рис. 3в). Изменчивость поллютантного показателя может изучаться как случайный процесс.

Интегральные показатели качества воды представляют собой взвешенные средние частных показателей. Они отражают результаты совместного действия всех факторов и событий, определяющих временную изменчивость Т-единого показателя (рис. 3г) и К-единого показателя (рис. 3д) на 28-летнем интервале. Изображенные на рисунках диаграммы достаточно близки. Это означает, что качество вод в Невской губе определяется, главным образом, не антропогенными поллютантами, а показателями других групп. В количественном выражении 70% времени воды губы классифицируется как умеренно-загрязненные и только 30% – как чистые с тенденцией перехода в умеренно-загрязненные.

Пространственная изменчивость показателей качества воды. Анализ экологических проблем водной системы и временной изменчивости качества вод Невской губы позволяет выделить три периода ее экологического состояния.

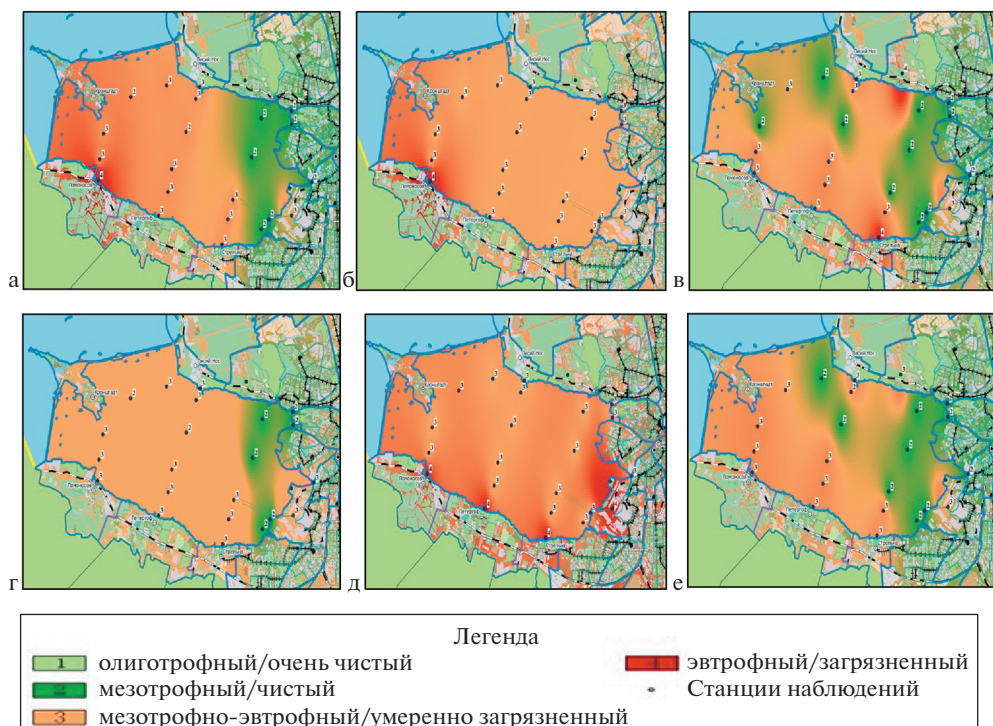


Рис. 5. Пространственная изменчивость качества вод по Т-единому показателю: а – 1998, б – 2007, в – 2014 и по К-единому показателю: г – 1998, д – 2007, е – 2014.

В качестве характерных представителей каждого из указанных в таблице периодов времени примем 1988, 2007, 2014 г.

Частный гидрофизический показатель. Низкая природная прозрачность ($P = 0.3\text{--}1.0$ м) и ее противоположность – высокая природная мутность (минимальная концентрация сестона $M = 2.5\text{--}5$ мг/м³) мелководной Невской губы объясняется взмучиванием донных осадков волновой и сдвиговой турбулентностью.

В 1989 г., в период строительства КЗС, воды на большей части губы классифицируются как загрязненные. Аномально низкая прозрачность вод губы в 2007 г. вызвана строительством пассажирского порта “Морской фасад”, созданием северной Лахтинской отмели и отвалов грунта на Южно-Лахтинской отмели [22]. Шлейф мутных вод в 2006–2007 гг. распространился в восточной части Финского залива на 150 км до о. Мощный [2]. Строительство морского пассажирского порта нанесло долговременный урон экологическому состоянию Невской губы [24]. В 2014 г. осуществляются строительство центрального участка автомагистрали “Западного скоростного диаметра” от морского порта до р. Екатерингофки и сооружение портового комплекса “Бронка”, что сказалось, в основном, на загрязнении южной зоны Невской губы.

Частный гидрохимический показатель. Его пространственное распределение связано с особенностями циркуляции вод в Невской губе, сформировавшимися в связи со строительством КЗС, и степенью очистки хозяйственно-бытовых вод города на стан-

Таблица 3. Оценки статистических связей между показателями трофности и качества вод (обозначения в тексте)

Интегральные показатели	Частные показатели трофности и качества вод			
	Гидрофизич.	Гидробиологич.	Гидрохимич.	Антропогенные загрязнители
	1998 год			
Трофность	$r = 0.88$	$r = 0.77$	$r = 0.66$	–
Качество	$r = 0.93$	$r = 0.65$	$r = 0.66$	$r = 0.58$
	2007 год			
Трофность	$r = 0.77$	$r = 0.73$	$r = 0.84$	–
Качество	$r = 0.74$	$r = 0.58$	$r = 0.84$	$r = 0.38$
	2014 год			
Трофность	$r = 0.81$	$r = 0.56$	$r = 0.95$	–
Качество	$r = 0.87$	$r = 0.47$	$r = 0.93$	$r = 0.77$

циях аэрации. В губе образовались центральная проточная, южная и северная застойные зоны [8]. Они отчетливо прослеживаются на карте пространственного распределения гидрохимического показателя (рис. 4а, 4б, 4в). Южная и Северная зоны характеризуются замедленным водообменом, высокой способностью накапливать органические вещества, пониженным содержанием кислорода.

Области высоких концентраций биогенных веществ формируются в районах Ломоносовской отмели, у Петергофа, Стрельны на юге и Лисьего Носа – на севере. Центральная часть губы по гидрохимическому показателю оценивается как “чистая”. Глубокая очистка сточных вод от биогенных элементов на станциях аэрации положительно сказалась на качестве вод (рис. 4в).

Частный гидробиологический показатель. По этому показателю большая часть акватории губы классифицируется как “чистая”. Высокая мутность воды, несмотря на обилие биогенных веществ, препятствует развитию автотрофного звена экосистемы (рис. 4г, 4д, 4е).

Частные показатели качества вод (рис. 5). Сравнение карт Т-единого и К-единого показателей качества вод Невской губы показывает их близость. Во все характерные годы значительная часть акватории относится к умеренно-загрязненному классу качества вод. Исключением является восточная часть губы, относящаяся в 1998 и 2014 г. к чистому классу (рис. 5).

Почти полная идентичность карт и К-единых показателей еще раз подтверждает вывод о том, что качество вод Невской губы определяется показателями, определяющими их продуктивность, и, в первую очередь, мутностью воды и концентрацией биогенных элементов. Антропогенные загрязнители имеют второстепенное значение. Подтверждением этому является табл. 3, в которой приводятся коэффициенты корреляции (r) между частными и сводными показателями качества вод Невской губы.

Анализ таблицы показывает, что частные показатели, влияющие на продуктивность водоема, влияют в равной степени и на сводные показатели качества воды. При этом приоритетными являются гидрофизический (прозрачность) и гидрохимический показатели. Коэффициенты корреляции антропогенных загрязнителей низкие.

ВЫВОДЫ

1. Классическое определение антропогенного эвтрофирования водоема как повышение его биологической продуктивности за счет избыточного притока биогенных веществ, для Невской губы как мелководного проточного водоема, неприемлемо. Развитие автотрофного звена экосистемы здесь лимитируется световой энергией. Совокупность показателей, влияющих на продуктивность, следует рассматривать как подмножество показателей качества воды.

2. Показатели состава и свойств вод Ладожского озера в значительной мере определяют качество вод Невской губы, выступая в качестве фона, на который накладываются местные факторы.

3. Основными факторами, приводящими к ухудшению качества вод Невской губы, являются хозяйственно-бытовые стоки Санкт-Петербурга. Строительство туннельных канализационных коллекторов и станций аэрации, а главное, внедрение в 2005 г. технологии глубокой очистки стоков от биогенных веществ, существенно уменьшило нагрузку на экосистему губы.

4. Вторым по значимости фактором, ухудшающим качество вод губы, являются практически не прекращающиеся с начала 2000-х годов гидротехнические работы на ее акватории. В частности, строительство пассажирского порта “Морской фасад Санкт-Петербурга” снизило качество вод губы до загрязненного класса и нанесло долговременный урон ее экосистеме.

5. Существенным фактором, оказывающим отрицательное влияние на качество вод губы, является Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений. Строительство КЗС привело к расширению застойных зон у северного и южного берегов губы, а главное, к снижению способности экосистемы губы к самоочищению во время значительных наводнений.

6. Качество вод губы в большей степени определяется показателями, определяющими продукционные свойства водоема, и, в меньшей степени, – сбросом антропогенных поллютантов с предприятий города и воздействием автомобильного и водного транспорта.

Исследования поддержаны грантом РФФИ № 19-05-00683.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабаш Ю.Л., Варский Б.В., Зиновьев В.Т. и др. Вопросы статистической теории распознавания образов М.: Советское радио, 1967. 400 с.
2. Бродский А.К., Панкова Е.С., Сафронова Д.В. Литоральные сообщества эстуария реки Невы: Их структура и динамика в условиях антропогенного пресса // Биосфера. 2016. № 8. С. 16–27.
3. Гришман З.М., Левченко В.Ф., Меншуткин В.В. Базы данных по экологии Финского залива и их структура // Невская губа – опыт моделирования. СПб. 1997. С. 219–233.
4. Дмитриев В.В., Мякишева Н.В., Хованов Н.В. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. I. Качество природных вод // Вестник СПбГУ. Геология, география, 1996. № 21. С. 40–52.
5. Дмитриев В.В., Мякишева Н.В., Хованов Н.В., и др. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. II. Трофический статус водных экосистем // Вестник СПбГУ Геология, география. 1997. № 23. С. 51–67.
6. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: НАУКА, 2004. 294 с.
7. Ежегодники качества морских вод восточной части Финского залива по гидробиологическим показателям с 1988 по 2016 годы. Под ред. Н.И. Силиной. СПб.: Гидрометеониздат, 2016. (Фонды СЗ УГМС).

8. Еремина Т.Р., Ланге Е.К., Еришова А.А., Исаев А.В., Хаймина О.В. Оценка состояния вод Финского залива по индикаторам ХЕЛКОМ на основе данных наблюдений // Тез. докл. XII Меж. экологического форума “День Балтийского моря”. СПб.: Цветпринт, 2011. С. 50–51.
9. Знаменский В.А. “Наша” дамба. Современное разрушение города и его водной среды под флагом их защиты // Звезда, 2005. № 10. С. 171–189.
10. Кондратьев С.А. Основные положения концепции снижения негативного антропогенного воздействия на Финский залив и научная обоснованность плана действий Хелком по Балтийскому морю, 2010. № 4 (30). С. 44–50.
11. Макаров О.Н., Малько А.М., Семенцов В.И., Степанов М.М. Разработка справочно-информационной базы данных по источникам загрязнения акватории Невы–Невской губы в черте города Санкт-Петербурга и Ленинградской области // Невская губа – опыт моделирования. СПб., 1997. С. 237–253.
12. Менишуткин В.В. Общая научная концепция программы “Невская губа” // Невская губа – опыт моделирования. СПб., 1997. С. 13–43.
13. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. Под. ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 286 с.
14. Нежиховский Р.А. Река Нева и Невская губа. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 112 с.
15. Отчет по проекту BASE, ХЕЛКОМ. Оценка текущего состояния “горячих точек” ХЕЛКОМ в г. Санкт-Петербург, Калининградской и Ленинградской областях // Программы ЖСР в соответствии с решением Министерской встречи ХЕЛКОМ. СПб.: ООО “ЭкоММак”, 2013. 211 с.
16. Румянцев В.А., Кудерский Л.А. Ладожское озеро: Общая характеристика, экологическое состояние // Общество. Среда. Развитие (TerraHumana), 2012. С. 222–229.
17. Сергеев Ю.Н., Лю Сулин. Модели водных экосистем. Имитация антропогенного эвтрофирования водоемов. СПб.: ГеоГраф, 2005. 320 с.
18. Суетова И.А., Ушакова Л.А. Эколого-географическое картографирование Финского залива // Материалы Международной конференции ИНТЕРКАРТО “ГИС для устойчивого развития территорий Хельсинки, Санкт-Петербург”. СПб.: Наука, 2002. Т. 3. С. 322–326.
19. Суслопарова О.Н., Шурухин А.С., Мицкевич О.И., Терешенкова Т.В., Хозяйкин А.А., Митковец В.Н. Оценка влияния интенсивных гидротехнических работ, проводимых в последнее десятилетие в прибрежных районах Невской губы на ее биоту // Ученые записки. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. № 28. С. 110–120.
20. Хованов Н.В. Статистические модели теории квалиметрических шкал. Л.: ЛГУ, 1986. 79 с.
21. Усанов Б.П., Викторов С.В., Сухачева Л.Л. Новый “удар” по Невской губе // Транспорт Российской Федерации. Наука, экономика, практика, 2008. № 3–4. С. 70–74.
22. HELCOM. The fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-5) Balt. Sea Environment. Proc. No, 2011. 122 p.
23. HELCOM. Eutrophication Status of the Baltic Sea 2007–2011 – A concise thematic assessment Baltic Sea Environment 143, 40 p.
24. Ryabchuk D., Vallius H., Zhamoida V., Kotilainen A.T., Rybalko, A., Malysheva N., Deryugina N., Sukhacheva L. Pollution history of Neva Bay bottom sediments (eastern Gulf of Finland, Baltic Sea) // Baltica. 2017. 30 (1), p. 31–46.

Model of pattern recognition as a tool for assessing the quality of the waters in the Neva Bay

Y. Sergeev^{a,#}, A. Denisenko^{a,##}, V. Dmitriev^{a,###}, and V. Kulesh^{a,####}

^a Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

[#]e-mail: unsergeev36@gmail.com

^{##}e-mail: nastya.denisenko.94@mail.ru

^{###}e-mail: vasilij-dmitriev@rambler.ru

^{####}e-mail: vpkulesh@gmail.com

The article describes the results of studying the spatiotemporal variability of water quality in the Neva Bay located in the eastern part of the Gulf of Finland in the Baltic Sea. Assessment of water quality in the period 1988–2016 was performed using the pattern recognition model, which includes training and recognition systems. Recognition was done on 14 characteristics, combined into 4 private and 2 complex indicators. Causal relationships between water quality and its determining factors have been established. The quality of water is largely determined by the indicators of reservoir productivity and, to a lesser extent, the arrival of an-

thropogenic pollutants. The chemical composition of the Lake Ladoga water is used as the background for the Neva Bay on which discharges of nutrients from aeration stations are applied. The technology of deep wastewater treatment was introduced in 2005, which significantly improved the ecological situation in the Neva Bay. The main factor that inhibits eutrophication and worsens the quality of water is hydro technical works. The high turbidity of the water generated by limits the primary production and is the main factor preventing the flowering of water in the Neva Bay. From 1988 to 2003 the water quality was considered “clean”. Over the remaining years it has changed to become “moderately polluted”. In the space, the quality of water varies from “very clean” to the “contaminated” during the construction of the port “Marine Façade” of St. Petersburg.

Key words: Neva Bay, trophic status, water quality, pattern recognition model, complex indicators, water quality maps

REFERENCES

1. *Barabash Yu.L., Varskii B.V., Zinov'ev V.T. i dr.* Voprosy statisticheskoi teorii raspoznavaniya obrazov. M.: Sovetskoe radio, 1967. 400 s.
2. *Brodskii A.K., Pankova E.S., Safronova D.V.* Litoral'nye soobshchestva estuariya reki Nevy: Ikh struktura i dinamika v usloviyakh antropogennogo pressa // Biosfera. 2016. № 8. S. 16–27.
3. *Grishman Z.M., Levchenko V.F., Menshutkin V.V.* Bazy dannykh po ekologii Finskogo zaliva i ikh struktura v A.F. Alimov, O.A. Andreev, G.P. Astrakhantsevi dr., Nevskaya guba – opyt modelirovaniya, 1997. S. 219–233.
4. *Dmitriev V.V., Myakisheva N.V., Khovanov N.V.* Mnogokriterial'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya i ustoichivosti geosystem na osnove metoda svodnykh pokazatelei I. Kachestvo prirodnykh vod // Vestnik SPbGU Geologiya, geografiya. 1996. № 21. S. 40–52.
5. *Dmitriev V.V., Myakisheva N.V., Khovanov N.V., i dr.* Mnogokriterial'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya i ustoichivosti geosystem na osnove metoda svodnykh pokazatelei. II. Troficheskii status vodnykh ekosistem // Vestnik SPbGU Geologiya, geografiya. 1996. № 23. S. 51–67.
6. *Dmitriev V.V., Frumin G.T.* Ekologicheskoe normirovanie i ustoichivost' prirodnykh sistem. Sankt-Peterburg: NAUKA, 2004. 294 s.
7. Ezhegodniki kachestva morskikh vod vostochnoi chasti Finskogo zaliva po gidrobiologicheskim pokazatelyam s 1988 po 2016 gody, 2016. Pod red. N.I. Silinoy. SPb.: Gidrometeoizdat, 2016. (Fondy SZ UGMS).
8. *Eremina T.R., Lange E.K., Ershova A.A., Isaev A.V., Khaimina O.V.* Otsenka sostoyaniya vod Finskogo zaliva po indikatoram KhELKOM na osnove dannykh nablyudenii v Tez. dokl. Kh II Mezhd. Ekologicheskogo foruma “Den' Baltiskogomorya”. 2011. S. 50–51.
9. *Znamenskii V.A.* Nasha damba. Sovremennoe razrushenie goroda i ego vodnoi sredy pod flagom ikh zashchity // Zvezda. 2005. № 10. S. 171–189.
10. *Kondrat'ev S.A.* Osnovnye polozheniya kontseptsii snizheniya negativnogo antropogennogo vozdeistviya na Finskii zaliv i nauchnaya obosnovannost' plana deistvii Khelkom po Baltiskomu moryu. 2010. № 4 (30). S. 44–50.
11. *Makarov O.N., Mal'ko A.M., Sementsov V.I., Stepanov M.M.* Razrabotkaspravochno-informatsionny i bazy dannykh po istochnikam zagryazneniya akvatorii Nevy – Nevskoi guby v cherte goroda Sankt-Peterburga i Leningradskoi oblasti v A.F. Alimov, O.A. Andreev, G.P. Astrakhantsev i dr. // Nevskaya guba-opyt modelirovaniya. 1997. S. 237–253.
12. *Menshutkin V.V.* Obshchaya nauchnaya kontseptsiya programmy “Nevskaya guba” v A.F. Alimov, O.A. Andreev, G.P. Astrakhantsev i dr. // Nevskaya guba – opyt modelirovaniya. -Sankt-Peterburg. 1996. S. 13–43.
13. Metodicheskie osnovy otsenki i reglamentirovaniya antropogennogo vliyaniya na kachestvo poverkhnostnykh vod. Leningrad.: Gidrometeoizdat, 1987. 286 s.
14. *Nezhikhovskii R.A.* Reka Neva i Nevskaya guba. Leningrad, 1981. 112 s.
15. Otchet po projektu BASE, KhELKOM. Otsenka tekushchego sostoyaniya “goryachikh toчек” KhELKOM v g. Sankt-Peterburg, Kaliningradskoi Leningradskoi oblastiakh/Programmy JCP v sootvetstvii s resheniem Ministerskoi vstrechi KhELKOM.-Sankt-Peterburg. 2016. 211 s.
16. *Rumyantsev V.A., Kuderskii L.A.* Ladozhskoe ozero: Obshchaya kharakteristika, ekologicheskoe sostoyanie //Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana). 2012. S. 222–229.
17. *Sergeev Yu.N., Lyu Sulin.* Modeli vodnykh ekosistem. Imitatsiya antropogennogo evtrofirovaniya vodnoemov. Sankt-Peterburg.: GeoGraf, 2005. 320 s.

18. *Suetova I.A., Ushakova L.A.* Ekologo-geograficheskoe kartografirovaniye Finskogo zaliva v Materialakh Mezhdunarodnoi konferentsii INTERKARTO "GIS dlya ustoichivogo razvitiya territorii Khel'sinki, Sankt-Peterburg. Sankt-Peterburg // Nauka. 2002. T. 3. S. 322–326.
19. *Susloparova O.N., Shurukhin A.S., Mitskevich O.I., Tereshenkova T.V., Khozyaikin A.A., Mitkovets V.N.* Otsenka vliyaniya intensivnykh gidrotekhnicheskikh rabot, provodimykh v poslednee desyatiletie v pribrezhnykh raionakh Nevskoi guby na ee biotu // Uchenye zapiski. 2005. Sankt-Peterburg; Gidrometeoizdat. № 28. S. 110–120.
20. *Khovanov N.V.* Statisticheskie modeli teorii kvalimetriceskikh shkal. L.: Izd-vo LGU, 1986. 79 s.
21. *Usanov B.P., Viktorov S.V., Sukhacheva L.L.* Novyi "udar" po Nevskoi gube Transport Rossiiskoi Federatsii // Nauka, ekonomika, praktika. 2008. № 3–4. S. 70–74.
22. HELCOM. The fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-5) Balt. Sea Environment. Proc. No, 2011. 122 p.
23. HELCOM. Eutrophication Status of the Baltic Sea 2007–2011 – A concise thematic assessment Baltic Sea Environment 143, 40 p.
24. *Ryabchuk D., Vallius H., Zhamoida V., Kotilainen A.T., Rybalko A., Malysheva N., Deryugina N., Sukhacheva L.* Pollution history of Neva Bay bottom sediments (eastern Gulf of Finland, Baltic Sea) // Baltica. 2017. 30 (1), p. 31–46.