

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЗ. СЕСТРОРЕЦКИЙ РАЗЛИВ

Введение. Озеро Сестрорецкий Разлив является искусственным водоемом, созданным для нужд оружейного завода в бассейне рек Черная и Сестра в 1721–1732 гг., и представляет водохранилище с площадью зеркала воды 10,6 км². Площадь водосбора составляет 56,3 тыс. га, объем воды — около 16200 тыс. м³. Время условного водообмена не превышает месяца.

Озеро находится в пределах Санкт-Петербургского мегаполиса и испытывает антропогенные нагрузки, типичные для промышленных районов. Среди видов функционального землепользования на водосборе озера выделяются: лесопарковая зона — 68% территории, сельскохозяйственные угодья и садоводства — 26%, болота — 4% и урбанизированные площади — 2% [1]. К основным источникам загрязнения водоема относятся: сбросы с очистных сооружений поселков и воинских частей по р. Черной, диффузный сток с садовых участков и сельскохозяйственных угодий по р. Сестре, ливневые воды с городской территории и поступление загрязняющих веществ в результате атмосферного переноса. Водоем активно используется в рекреационных целях (отдых, купание, любительский лов рыбы и т. д.), а также как источник питьевого и промышленного водоснабжения. Это накладывает очень жесткие экологические и санитарно-гигиенические требования к его состоянию. Однако, несмотря на столь большое значение водоема для жителей Сестрорецка и Санкт-Петербурга, до настоящего времени отсутствовали данные о состоянии донных осадков, о содержании в воде и осадках высокотоксичных химических веществ. Не было сведений о характере литодинамических процессов, протекающих на дне водоема, что возбуждало разговоры о резком усилении заносимости акватории в последние годы [2] и служило основой для предложений по проведению дноочистных работ.

Летом 2002 г. в рамках договора с Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Администрации Санкт-Петербурга были проведены исследования по оценке геоэкологического состояния озера. Ее методика базировалась на комплексном изучении разреза донных осадков, определении мощности озерных отложений, проведении лабораторных анализов на содержание в осадках широкого перечня имеющих приоритетное значение загрязняющих веществ. Результатами обработки и анализа полученных материалов явились разработка и обоснование перечня мероприятий по оздоровлению экосистемы озера.

Донные отложения при оценке состояния водного объекта, контроле загрязнения и мониторинге водной среды играют важную индикационную роль, что обусловлено в первую очередь информативностью получаемых результатов и их воспроизводимостью. Донные осадки являются консервативной системой, способной накапливать и хранить информацию о состоянии и изменении геохимических, динамических, климатических, неотектонических условий внешней среды, процессов массопереноса, в том числе вызванных техногенным воздействием. Реакция на них проявляется в трансформации гранулометрического, минералогического и химического составов, изменении окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий в донных осадках и водной среде, перераспределении литодинамических потоков, изменении скоростей осадконакопления и т. д. [3]. Исходя из этого, донные осадки были выбраны в качестве основного объекта геоэкологических исследований.

Результаты и их обсуждение. Морфолитодинамическое районирование оз. Сестрорецкий Разлив (рис. 1) проведено по результатам измерения глубины воды, изучения разреза, мощности и литологического состава современных осадков. Всего было выполнено 100 станций геологического пробоотбора.

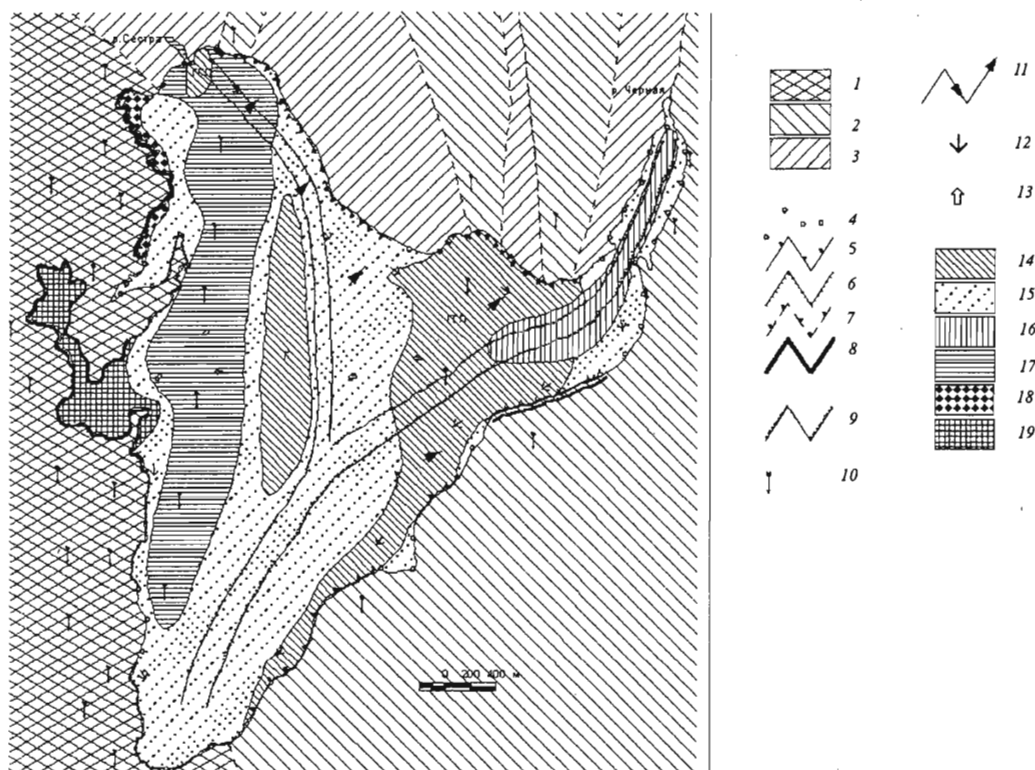


Рис. 1. Схема морфолитодинамических обстановок оз. Сестрорецкий Разлив.

Рельеф: 1-3— приморская равнина: 1— территория застройки на прибрежно-морском аккумулятивном рельефе (дюнах), 2— площади развития кустарниково-древесной растительности на песчаных отложениях, 3— площади развития торфяных болот; 4-8— берега: 4— аккумулятивные органогенные, 5— размыва (аккумулятивно-абразионные), 6— мало измененные, 7— активного размыва (абразионные), 8— техногенно измененные; 9-10— палеорельеф: 9— палеоречные долины, 10— направление оси простираения древних береговых валов. Гидродинамический режим: 11— направление активной волно-ветровой деятельности, 12— направление вдольбереговых течений, 13— направление течений при попусках воды (сезонно-техногенных). Обстановки осадконакопления: 14— площади размыва дна с выходами галечно-гравийно-песчаных отложений (ГПП), с выходами глинистых отложений (Г), 15— площади аккумуляции (с накоплением илстых, алевро-илстых осадков мощностью до 1 м, реже песков), 16— площади аккумуляции в зоне выносных течений (с накоплением песчано-алевритовых осадков мощностью до 1,5 м), 17— площади широкого развития высшей водной растительности на мелководье и островах, 18— площади техноседиментогенеза с отсыпкой гравийно-песчаной смеси, 19— площади техноседиментогенеза с накоплением черных илстых осадков мощностью до 1,5-2 м.

По полученным данным, средняя глубина озера составляет около 1,5 м. В центральной части глубины меняются в пределах от 1,8 до 2,0 м, в западной части на заросшей водной растительностью акватории — от 0,0 до 1,0 м. В северо-восточной лагуне, примыкающей к устью р. Черной, максимальная глубина достигает 1,5 м. На подводящих каналах к плотине Гаусмана отмечены максимальные для озера глубины — до 4,0 м. По-видимому, этот участок подвергнулся углублению в период формирования системы водообеспечения оружейного завода.

По характеру рельефа дна центральная и южная акватории представляют собой чашу с выровненной поверхностью и относительно пологими береговыми откосами. Угол подводного берегового склона меняется от 0,5 до 3°. Типичными для рельефа дна водоема являются субазральные формы рельефа — древние береговые валы субмеридионального простираения,

отражающие уровни стояния древнего моря. Они во многом определяют характер и направленность современных литодинамических процессов. Затопленный древний береговой вал (палеодюна), сложенный песчано-гравийным материалом, отмечается в рельефе восточной части озера в виде протяженной возвышенности, отчленяющей лагуну р. Черной от остальной акватории. Подобный вал, простирающийся в западной части озера, предположительно служит одной из причин мелководности этого участка акватории и развития на дне высшей водной растительности.

Изучение литологического состава осадков озера показало большое разнообразие (для небольших мелководных водоемов) типов, отражающих особенности рельефа дна и строения берегов, характер гидродинамических процессов.

Подстилающими («коренными») для озерных отложений являются синие плотные глины. В центральной части современного озера и вдоль восточного побережья они практически выходят на поверхность или перекрываются небольшим по мощности слоем современных осадков. По результатам силикатного анализа установлено, что глины формировались в относительно холодном гумидном климате в условиях физического выветривания в слабокислой среде. Наиболее вероятным временем образования породы является нижний голоцен, когда изучаемая территория омывалась анциловым озером. Местами глины перекрываются более поздними отложениями, появившимися в доозерный период: белесыми и серыми суглинками, мелкозернистыми песками. Гравийно-песчаные осадки распространены в восточной и северо-западной частях озера и связаны с аккумулятивными песчаными валами прибрежно-морского гелезиса, предположительно средне-позднеголоценового времени.

Основные вещественно-генетические типы современных отложений представлены полужидкими и мягкими глинистыми илами, торфянистыми илами, миктитами различного состава, а также суглинками с высоким содержанием органического детрита. Большое количество неперегнивших растительных и древесных остатков — существенная черта состава нижней части разреза отложений озера. Мощность современных донных осадков меняется от 0,0 до 1,3 м.

В северной и южной частях водоема на серых суглинках залегают полужидкие, переходящие вниз по разрезу в мягкие, темно-серые илы, содержащие детрит. В полузамкнутых бухтах по западному берегу в условиях дефицита кислорода они приобретают черный цвет. По гранулометрическому составу отложения представлены преимущественно мелко- и крупноалевритовой фракциями. Их мощность не превышает 1 м.

В северо-западной части озера и на отдельных участках дна, примыкающих к западному побережью, вскрыта толща оторфованных илов. Они характеризуются коричневым цветом, который придают гуминовые кислоты, продуцирующиеся в процессе торфообразования. В верхней части отложения представлены полужидкими илами темно-серого и коричневатого цветов мощностью до 0,3 м. Ниже по разрезу обнаружен слой торфа разной степени разложения растительных и древесных остатков, в котором вниз по разрезу происходит постепенное увеличение глинистости и уменьшение количества неперегнившей органики. Образование отложений нижней части разреза вызвано переработкой в начальный период формирования водохранилища торфянистого материала и почвенного слоя на положительных формах рельефа и сносом их в затопленные долины и поймы. В целом мощность описываемого разреза колеблется от 0,5 до 2,0 м.

В восточной и южной частях озера вблизи берега встречается маломощный слой гравийно-песчаных отложений с включением глинистых окатышей. Эти осадки, как правило, залегают на синих глинах и являются своеобразной отмыткой, возникшей в результате постуления материала из береговых источников.

Практически на всей акватории озера формирование поверхностного слоя отложений происходит в окислительной обстановке, о чем свидетельствует зеленовато-сероватый цвет наилка толщиной 1–3 см. Развитие окислительных условий на разделе осадок—вода обусловлено небольшой глубиной озера, интенсивным перемешиванием воды и минимальным распространением застойных зон. Геоэкологическое значение окислительных условий среды осадконакопления выражается в следующем:

- 1) окисленный слой донных осадков служит барьером при переходе тяжелых металлов (ТМ) в растворенные формы, т. е. ограничивает процессы вторичного загрязнения воды;
- 2) происходит практически полное окисление легкоразлагаемых форм органических веществ, являющихся одним из основных видов поллютантов для водоемов, находящихся внутри городской агломерации;
- 3) создаются благоприятные условия для развития бентосных сообществ и микроорганизмов на дне, усиливающих ассимиляционную способность среды.

Выделено несколько типов берегов, среди которых преобладает тип низменных мало измененных или практически неизмененных берегов (см. рис. 1). Наибольшую опасность по своим геоэкологическим последствиям представляет северное побережье озера, примыкающее к болоту. Здесь отмечается размыв берега протяженностью около 4 км. Процессы размыва в первую очередь вызваны господствующими летом западными и юго-западными ветрами, а также малой устойчивостью самого побережья, сложенного торфяниками, к физическому воздействию. В процессе размыва формируются активные клифы высотой от 1,0 до 1,5 м. Вдоль побережья в полосе около 10–15 м на дне происходит интенсивное накопление торфов, поступающих из береговой зоны. Мощность их достигает 1 м. Анализ топографических материалов (топографическая съемка 1887–1895 гг.) и космоснимков (1989 г.) позволяет судить о динамике северного берега. Так, за прошедшие 100 лет скорость отступления берега на отдельных участках достигала 2,0 м в год.

В целом средняя мощность осадков оз. Сестрорецкий Разлив составляет около 0,45 м, а значения седиментометрических характеристик (табл. 1) подчеркивают активность литодинамического режима: на 40% поверхности дна доминируют процессы размыва и транзита, на 48% развиты процессы преобладающей аккумуляции и лишь 12% площади дна относится к зонам устойчивой аккумуляции. Участки размыва отмечаются не только в береговой зоне, но и в центральной части озера.

Таблица 1. Седиментометрические характеристики оз. Сестрорецкий Разлив

Диапазон мощности отложений, м	Площадь дна озера, %	Преобладающие литодинамические процессы	Объем отложений, тыс. м ³
0,0	13,0	Размыв	0,0
0,0–0,2	27,3	Транзит	289,0
0,2–0,5	25,1	Преобладающая аккумуляция	931,0
0,5–0,8	22,5	”	1550,0
0,8–1,0	7,8	Устойчивая аккумуляция	744,0
Более 1,0	4,3	”	524,0

Характер литодинамических процессов на дне водоема на протяжении всей истории развития был обусловлен особенностями палеорельефа и являлся компенсационным, направленным на снижение термодинамического потенциала. В настоящее время период «пенепленизации» практически завершен, о чем свидетельствует выровненный рельеф на месте палеодолин. Преобладающим процессом постепенно становится аккумуляция. По особенностям разреза донных отложений в истории формирования водоема выделяются два этапа осадкообразования. Первый характеризовался интенсивным перемывом почвенного слоя затопленной территории и сносом его на пониженные участки дна, главным образом в затопленные долины рек. Он длился несколько десятков лет, и за этот период накопился основной объем осадочного материала, который в разрезе осадков представлен илистым материалом с большим количеством растительных и древесных остатков, торфянистых прослоев. На втором этапе процесс осадкообразования происходил в основном за счет аллохтонных источников поступления материала. В разрезе осадков этот период представлен однородными илистыми отложениями темно-серого цвета.

По проведенным нами расчетам общее количество осадочного материала, накопившегося за 280 лет на дне, составило около 6058 тыс. т: 4272 тыс. т (70%) поступило в результате перемыва почвенных горизонтов и других образований в начальный этап формирования озера; 907 тыс. т (15%) осадочного материала связано с твердым стоком рек (с учетом 10% ежегодных потерь за счет выноса через гидротехнические сооружения); 729 тыс. т (12%) вызвано размывом берегов; 150 тыс. т (3%) образовались благодаря продуцированию органического вещества. На современном этапе осадконакопления ведущую роль играют твердый сток рек (64%), размыв берегов (26,5%) и продуцирование органического вещества (9,5%). Таким образом, в настоящее время поток абсолютных масс осадочного материала на участках аккумуляции — около $1240 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Эта величина свойственна для полузамкнутых морских и пресноводных акваторий, развивающихся в естественных природных условиях. В то же время водные объекты, находящиеся под сильным антропогенным прессом, испытывают существенно более высокие техногенные нагрузки, составляющие более $2000\text{--}5000 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [3].

Химическое загрязнение донных осадков озера оценивалось по содержанию ТМ, нефтяных углеводородов (НУВ), 3,4-бенз/а/пирена (3,4-БЗ), фенола, полихлорбифенилов (ПХБ), хлорорганических соединений (ДДТ, ГХЦГ и др.) и радионуклидов¹.

Распределение концентраций ТМ в поверхностных донных осадках озера носит относительно равномерный характер, о чем свидетельствуют коэффициенты вариации, которые, как правило, не превышают 50%. Абсолютные содержания в большинстве случаев отвечают значениям, типичным для водных объектов с невысокой степенью загрязнения. Исключение составляет кадмий, средние содержания которого превышают предельно допустимые концентрации (ПДК) элемента в почвах, что может говорить об общем загрязнении озера этим металлом. Отмечается выраженная тенденция концентрации цинка, кадмия, ртути и свинца в осадках западной части акватории, что можно объяснить воздействием городского хозяйства и автотранспорта.

Разброс содержаний НУВ в поверхностном слое донных отложениях составил 6,56–629,0 мг/кг. Минимальные значения установлены в песчаных осадках и подстилающих суглинках и глинах. Известно, что для водоемов, подверженных антропогенному загрязнению, типичными являются концентрации НУВ более 300 мг/кг. В данном случае высокие содержания НУВ обусловлены присутствием углеводородов в составе торфянистого материала. В пользу этого вывода свидетельствует тот факт, что самая высокая концентрация НУВ — 1358 мг/кг — была обнаружена в отложениях на глубине 0,6–0,8 м по разрезу осадков, формирование которых происходило ориентировочно в середине XIX в. В поверхностном слое на той же станции количество поллютанта было существенно ниже — 427 мг/кг. В целом среднее содержание НУВ в поверхностном слое осадков составило 302,3 мг/кг, в то время как в нижележащих горизонтах, насыщенных торфянистым материалом, по восьми пробам оно достигает 402,4 мг/кг.

Суммарные содержания фенолов по результатам анализа характеризуются очень низкими величинами, существенно уступающими загрязнению донных осадков урбанизированных водных объектов Северо-Запада России. Они изменялись в диапазоне от менее 10,0 до 311,0 мкг/кг. Характер пространственного распределения концентраций и очень высокий коэффициент вариации содержаний — 111,8% — позволяют предположить разную природу происхождения фенолов: с одной стороны, обусловленную антропогенным загрязнением озера, с другой — образованием фенолов в результате естественных процессов, вызванных разложением древесных остатков на дне водоема. При этом в условиях оз. Сестрорецкий Разлив доминирует второй фактор, так как накопление фенолов благодаря антропогенному воздействию очень локализовано и установлено лишь в устье р. Черной и в подходных каналах плотины Гаусмана.

Наиболее высокий уровень загрязнения донных осадков отмечается для 3,4-БЗ, относящегося к веществам 1-го класса опасности (чрезвычайно опасные вещества) в воде хозяйственно-

¹ Геохимические исследования проводились в аналитических лабораториях ВНИИ океангеологии и РЦ «Мониторинг Арктики».

питьевого и культурно-бытового назначения. Концентрации этого соединения колеблются в осадках от 1,94 до 189,0 мкг/кг. Относительно ПДК в почвах, которая составляет 20 мкг/кг, среднее содержание соответствует 1,8 ПДК, а максимальное — 9,5 ПДК. В поверхностных пробах отложений на двух станциях уровень концентрации превышает 100 мкг/кг. Пространственно они приурочены к западной части озера, а основным источником 3,4-БЗ в осадках служит автомобильный транспорт. Об антропогенном происхождении вещества свидетельствует тот факт, что в нижележащих горизонтах содержания поллютанта составляют 1,70–6,46 мкг/кг, что существенно ниже, чем в современных осадках (табл. 2). Факт загрязнения донных отложений этим канцерогеном требует специального изучения, так как озеро в настоящее время — источник питьевого и промышленного водоснабжения г. Сестрорецка, а водозаборы расположены в непосредственной близости от участков максимального загрязнения.

Диапазон содержаний ПХБ составляет 0,5–11,8 мкг/кг. Таким образом, суммарные концентрации ПХБ не внушают серьезных опасений в отношении загрязнения озера данным ксенобиотиком, тем более что ПДК бифенилов в почвах 100 мкг/кг. Максимальные концентрации ПХБ (до 12 мкг/кг) установлены в устье р. Черной, в верхнем течении которой находится асфальтобетонный завод, являющийся источником поступления бифенилов. Кроме того, повышенные концентрации ПХБ выявлены в западной и центральной частях озера. Из девяти проанализированных изомеров ПХБ преимущественное значение в загрязнении донных осадков озера имеют изомеры 52, 101, 118, 138 и 153.

Среди хлорорганических соединений отмечается обширная группа веществ, содержания которых ниже порога чувствительности метода (менее 0,1 мкг/кг), что отражает отсутствие выраженных источников загрязнения озера этим классом соединений. К таким веществам относятся пентахлорбензол, гексахлорбензол, α -ГХЦГ, β -ГХЦГ, γ -ГХЦГ, гептахлор, альдрин, октахлорстирол, гептахлорэпоксид, трансхлордан, цисхлордан, трансноахлор, цисноахлор, фотомирекс и мирекс. Из группы пестицидов в донных осадках обнаружено присутствие изомеров ДДТ и его метаболитов ДДД и ДДЕ в количестве от 0,60 до 116,2 мкг/кг с высоким коэффициентом вариации — 92,6%. Максимальный уровень загрязнения превышает 100 мкг/кг (ПДК почв — 100 мкг/кг). При этом основной вклад приходится на изомер 4,4-ДДД, являющийся промежуточным продуктом в процессе распада ДДТ. Пространственно максимальные уровни загрязнения выявлены в устье р. Черной, что обусловлено смывом пестицидов с сельскохозяйственных полей в период их активного применения в 1960–1970-х годах.

Удельная активность радионуклидов в донных осадках (^{137}Cs — $3,91 \pm 0,96$, ^{232}Th — $7,5 \pm 1,8$, ^{226}Ra — $2,7 \pm 1,3$ и ^{40}K — 196 ± 28 Бк/кг сухой массы) находится на уровне фоновой. ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{40}K представляют группу природных радиоактивных элементов, и их содержание практически целиком зависит от пород, слагающих дождевые осадки. На низкий (фоновый) уровень активности этих радионуклидов указывает сравнение с донными осадками Баренцева моря, где разброс их значений составляет соответственно 11–30, 5–21 и 227–459 Бк/кг [4]. ^{137}Cs является техногенным радионуклидом. Его активность в донных осадках озера соответствует фону (для сравнения — активность ^{137}Cs в донных осадках Баренцева, Карского морей варьирует в пределах 1,9–5,8 Бк/кг [4], а средняя активность в донных осадках Невской губы составляет 30 Бк/кг).

В целом показатели загрязнения донных отложений изученной группой поллютантов не являются критическими. Содержания ТМ, хлорорганических соединений, НУВ, полициклических ароматических углеводородов, фенолов и пестицидов в большинстве случаев не превышают ПДК или ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) и близки к региональному фону (см. табл. 2). Исключение составили цинк, кадмий, мышьяк, содержания которых в ряде случаев превышают ОДК в 1,5–2 раза, а также 3,4-БЗ, количество которого достигает 9,5 ПДК. Содержания ДДТ и его производных приближаются к ПДК только в устье р. Черной. Удельная активность радионуклидов (цезий, торий, радий и калий) находится на уровне фоновых значений.

С целью интерпретации полученных результатов и проведения геоэкологического районирования акватории озера по степени антропогенного воздействия был выполнен факторный

Таблица 2. Содержание загрязняющих веществ в поверхностном слое донных осадков оз. Сестрорецкий Разлив и сравнительные данные по водным объектам Северо-Запада России, ОДК и ПДК в почвах

Элемент	Оз. Сестрорецкий Разлив			ОДК (ПДК) в почвах [5]	Региональный фон [6]	Озера Карельского перешейка [7]	Ладожское озеро [8]
	n	Среднее содержание	Диапазон содержания				
Медь, мг/кг	26	31	13-72	132	22	38-43	---
Никель, мг/кг	26	36	16-90	80	12	17-32	4-100 (30)
Хром, мг/кг	26	46	22-65	--	60	28-42	8-140 (60)
Кобальт, мг/кг	26	17	7-36	--	20	20-23	2-60 (20)
Цинк, мг/кг	26	183	60-410	220	70	72-79	7-410 (110)
Свинец, мг/кг	26	37	19-72	130	30	26-28	6-210 (50)
Кадмий, мг/кг	26	2,2	0,4-4,3	2,0	0,4	--	--
Мышьяк, мг/кг	26	11	2-21	10	--	--	--
Ртуть, мг/кг	26	0,06	0,02-0,13	2,1	0,07	--	--
НУВ, мг/кг	49	302	6,56-629	--	48	--	2,9-1200 (116)
3,4-БЗ, мкг/кг	14	36,2	1,94-189	20	2	--	--
ДДТ и метаболиты, мкг/кг	22	29	0,6-116,2	100	0,3	--	0,0-5,0 (0,5)
ГХЦГ (суммарно), мкг/кг	22	< 0,1	< 0,1-0,1	100	0,1	--	0,0-18,0 (0,4)
ПХВ (суммарно), мкг/кг	22	5,0	0,5-11,8	60	0,4	--	--
Фенолы, мг/кг	8	0,094	< 0,01-0,311	--	3	--	1,26-136,1 (13,0)

Примечание. В скобках приведены средние значения.

анализ методом главных компонент. В анализируемой выборке использованы результаты определения ТМ как из поверхностного, так и из нижележащих горизонтов.

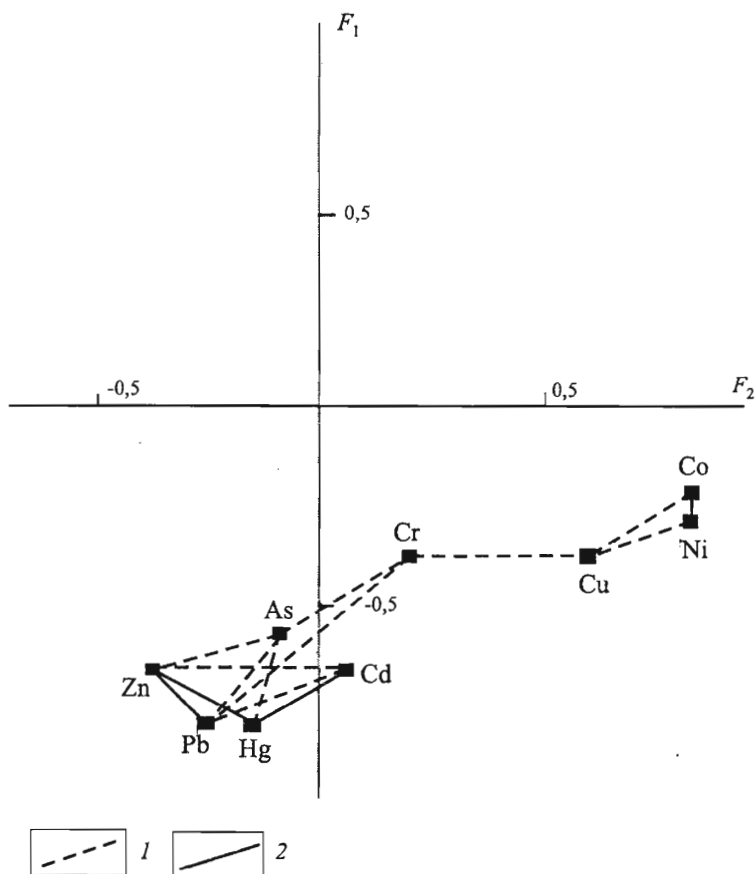


Рис. 2. Факторная структура содержания ТМ в донных отложения оз. Сестрорецкий Разлив.

Корреляционные связи: 1 — средние и слабые (коэффициенты корреляции 0,3–0,5), 2 — сильные (более 0,5).

По результатам анализа в корреляционной матрице выделяются две ковариантные группы: Zn—Pb—Cd—As—Hg и Cr—Co—Ni—Cu. Наиболее сильные корреляционные связи отмечаются для ассоциаций металлов Ni—Co и Zn—Pb—Hg, которые могут отражать как естественные геохимические процессы, так и антропогенное загрязнение. В структуре ведущих факторов, описывающих 72% изменчивости всех признаков (табл. 3), первая компонента (F_1) является фактором «кварцевого разбавления» и отражает природные закономерности дифференциации ТМ. Однако уже в этом факторе происходит генетически обусловленная дифференциация двух групп металлов: Cu, Ni, Cr, Co и Zn, Pb, Cd, Hg, As. Наиболее четко она проявляется в факторе F_2 (рис. 2), который интерпретируется как фактор антропогенного загрязнения. Таким образом, в структуре главных факторов образуются две парагенетические ассоциации металлов: Cu—Ni—Cr—Co и Zn—Pb—Cd—Hg—As, отражающие соответственно природные и техногенно обусловленные закономерности формирования химического состава донных осадков озера. Фактор F_3 с весовой нагрузкой около 15% отражает дифференциацию природного парагенезиса элементов на две типоморфные ассоциации Cu—Cr и Ni—Co, вызванные разной

Таблица 3. Структура ведущих факторов геохимического поля (нагрузки компонент)

Признаки	F_1	F_2	F_3
Cu	-0,39	0,64	-0,42
Ni	-0,18	0,85	0,25
Cr	-0,39	0,21	-0,82
Co	-0,17	0,84	0,37
Zn	-0,74	-0,32	0,38
Pb	-0,83	-0,24	-0,07
Cd	-0,66	0,03	0,33
As	-0,58	-0,06	0,01
Hg	-0,84	-0,20	-0,09
Вес. %	34,1	23,0	14,6

геохимической специализацией анциловых глин (и продуктов их перемыва) и современных илов.

Обоснование интерпретации первых двух факторов базируется на следующих данных. Металлы техногенной ассоциации характеризуются повышенными содержаниями в донных осадках озера (цинк, кадмий, мышьяк) и высокими значениями коэффициентов вариации (мышьяк, кадмий). Природная ассоциация типична для осадков озера, имеющих песчанистый состав. Низкие коэффициенты вариации могут свидетельствовать о наличии одного — естественного — источника поступления этих металлов. Кроме того, расчет коэффициентов парной корреляции для всей изученной группы поллютантов позволил выявить устойчивую положительную связь техногенной ассоциации металлов с ПХБ, пестицидами, 3,4-БЗ (табл. 4).

Таблица 4. Коэффициенты парной корреляции поллютантов в донных осадках озера

	Cu	Ni	Cr	Co	Zn	Pb	Cd	As	Hg	НУВ	3,4-БЗ	ПХБ	ДДТ
Cu	1,00												
Ni	0,49	1,00											
Cr	0,33	-0,08	1,00										
Co	0,57	0,77	-0,03	1,00									
Zn	-0,06	-0,18	0,09	-0,22	1,00								
Pb	-0,12	-0,20	-0,13	-0,33	0,76	1,00							
Cd	0,08	-0,25	0,11	-0,19	0,36	0,25	1,00						
As	0,07	-0,18	0,73	-0,24	0,40	0,26	0,05	1,00					
Hg	0,03	-0,19	0,10	-0,24	0,82	0,78	0,54	0,25	1,00				
НУВ	-0,12	-0,23	-0,26	-0,29	-0,17	-0,11	-0,28	-0,38	0,04	1,00			
3,4-БЗ	0,05	-0,15	0,11	-0,14	0,84	0,79	0,34	0,39	0,88	-0,18	1,00		
ПХБ	-0,27	-0,29	-0,33	-0,45	0,44	0,42	0,46	-0,39	0,55	0,22	0,34	1,00	
ДДТ	-0,18	-0,18	-0,08	-0,17	0,54	0,52	0,64	-0,08	0,72	-0,19	0,54	0,75	1,00

Примечание. Жирным выделены статистически достоверные при $p < 0,05$ значения коэффициентов корреляции.

Характер распределения компонент, т.е. выраженность тех или иных парагенетических ассоциаций в донных осадках, лег в основу проведения геоэкологического районирования акватории озера (рис. 3). По значениям компонент в структуре первых двух факторов выделены следующие группы проб донных осадков: 1) осадки с выраженным загрязнением и техногенной ассоциативностью металлов (Zn—Pb—Cd—Hg—As) — загрязненные осадки; 2) осадки с

отсутствием выраженного загрязнения и преимущественно техногенной ассоциативностью — осадки слабозагрязненные; 3) осадки с выраженной природной ассоциативностью металлов (Cu—Ni—Cr—Co) и невысоким загрязнением органическими компонентами — осадки незначительно загрязненные; 4) осадки с преобладающей кремнеземной составляющей в геохимической структуре — осадки незагрязненные.

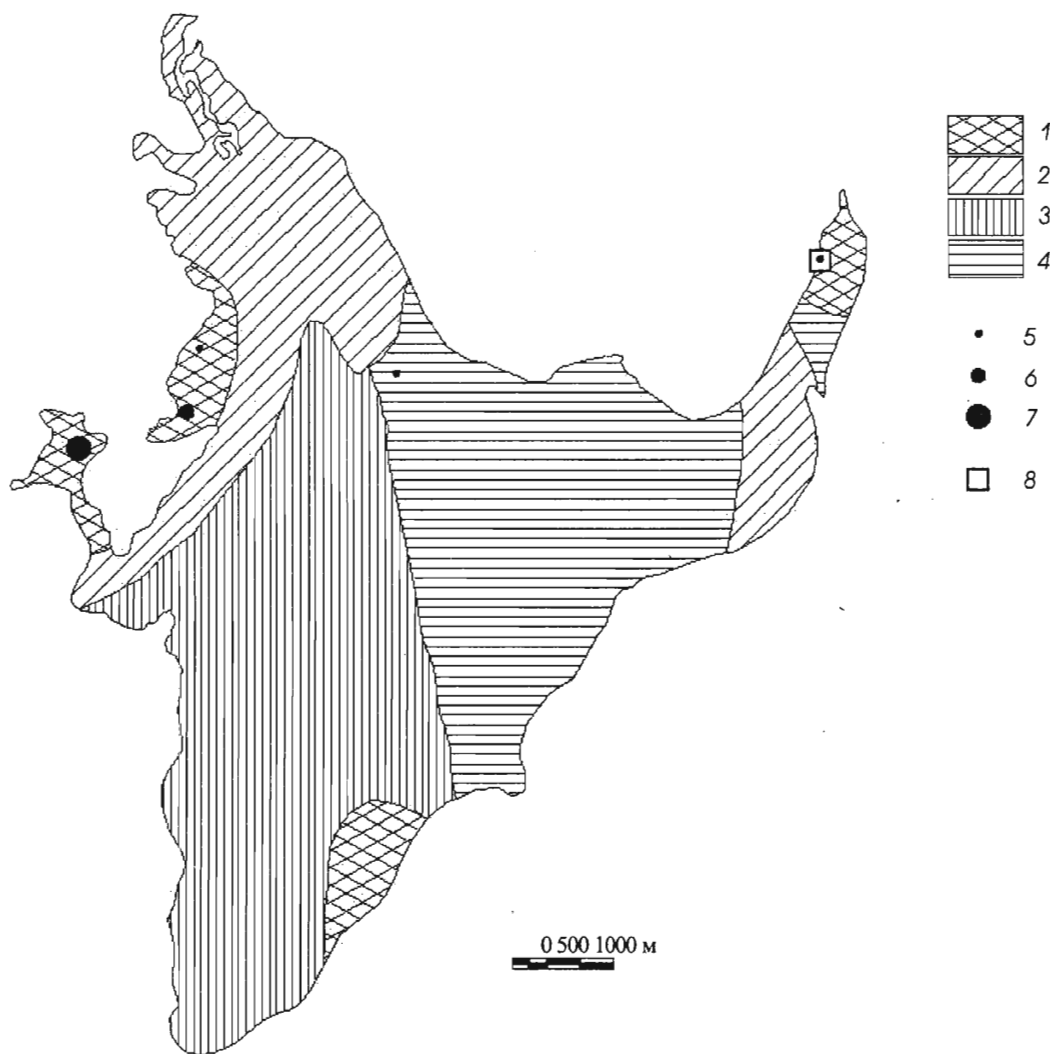


Рис. 3. Интегральная схема химического загрязнения донных отложений оз. Сестрорецкий Разлив.

1-4 — осадки: 1 — загрязненные ТМ, 2 — слабозагрязненные ТМ, 3 — незначительно загрязненные ТМ, 4 — незагрязненные; 5-7 — относительные содержания 3,4-бенз/а/пирена: 5 — 1,2-3,1 ПДК, 6 — 3,2-5,2 ПДК, 7 — 5,3-9,5 ПДК; 8 — относительное содержание ДДТ 1,16 ПДК.

Для оценки степени интегрального загрязнения донных осадков оз. Сестрорецкий Разлив ТМ и его возможного влияния на здоровье населения был применен показатель суммарного загрязнения почв (Z_C) [9]. Правомерность его использования в отношении донных осадков для ориентировочной оценки загрязнения обусловлена искусственным происхождением озера,

использованием его в рекреационных и хозяйственно-питьевых целях, а также отсутствием аналогичных показателей для оценки загрязнения озерных отложений. Кроме того, существующая практика интерпретации показателя в экологических исследованиях водных объектов [1] позволяет проводить сравнительный анализ получаемых результатов. Показатель рассчитывается по уравнению

$$Z_C = \left[\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{i\phi}} \right] - (n - 1),$$

где C_i — фактическое содержание загрязняющего вещества в осадке; $C_{i\phi}$ — фоновое содержание загрязняющего вещества или его ПДК (ОДК); n — количество аномальных (превышающих фоновые значения или ПДК) веществ.

Концентрации в донных отложениях оз. Сестрорецкий Разлив меди, никеля, цинка, свинца, кадмия и мышьяка сравнивались с ОДК ТМ в почвах с $pH > 5,5$, хрома и ртути — со значениями регионального фона (см. табл. 3). По проведенным расчетам показатель загрязнения на отдельных станциях колебался от 2 до 7. Это существенно меньше, чем показатель суммарного загрязнения донных осадков водоемов Санкт-Петербурга (озера Верхнее Суздальское, Среднее Суздальское, Нижнее Суздальское, Охтинское водохранилище, Юнтоловский пруд, Шуваловский карьер, Лахтинский Разлив и др.), в которых значение Z_C колеблется в диапазоне 10–60 [1]. Таким образом, рассчитанный показатель позволяет отнести уровень загрязнения донных осадков оз. Сестрорецкий Разлив ТМ к категории «допустимое загрязнение».

Заклучение. Почти за 300-летнюю историю существования водохранилища возник относительно устойчивый и стабильный во времени водный биогеоценоз. Озеро Сестрорецкий Разлив обладает уникальной способностью к самовосстановлению экосистемы и ассимиляционной емкостью к химическому загрязнению и заилению, не типичными для искусственных водоемов. Можно отметить несколько причин устойчивости геосистемы озера по отношению к антропогенному воздействию: 1) отсутствие прямых сбросов промышленных и коммунально-бытовых вод в озеро на протяжении всей его истории, что само по себе на территории мегаполиса — явление исключительное; 2) относительно быстрый период обновления воды, равный 1 месяцу, и технические возможности регулирования водообмена; 3) превышение скорости деградации над величиной первичной продукции и высокое содержание кислорода в придонном слое; 4) сбалансированность литодинамических процессов в озере, где на 40% площади дна преобладают процессы размыва и транзита осадочного материала, а средняя мощность озерных отложений не превышает 0,45 м; 5) благоприятные физико-химические условия (окислительная обстановка) на разделе вода—дно, увеличивающие ассимиляционную емкость осадков и в целом водной среды; 6) сезонная смена кислотно-щелочных показателей среды в диапазоне 6,5–9,0, регулирующая потоки вещества на разделе вода—дно, что обуславливает сглаживание пространственных геохимических аномалий природного и антропогенного происхождения.

Перечисленные факторы в настоящий момент являются необходимым и достаточным условием относительно благоприятного развития экосистемы озера. Задача заключается в их поддержании и принятии превентивных мер, не носящих кардинальный водохозяйственный характер. Дноочистные работы приведут (в связи с мелководностью и небольшой площадью озера) к деградации экосистемы и затем к ее длительному восстановлению. Неизбежно изменение литодинамического режима, стабилизация которого либо вообще будет невозможна, либо затянется на очень длительное время, а уровень загрязнения вновь формирующихся после очистки донных осадков останется на прежнем (современном) уровне. Высока вероятность того, что мероприятия по регулярной очистке дна озера от заиления станут необходимым средством его поддержания в качестве водоема.

В то же время в перечень обязательных мероприятий по охране водной среды оз. Сестрорецкий Разлив и обеспечению экологической безопасности населения следует включить: 1) прекращение использования озера в хозяйственно-питьевых целях и проведение углубленного изучения химического состава воды на содержание высокотоксичных соединений; 2) исследование концентраций загрязняющих веществ (ТМ, ПХБ, пестициды 3,4-БП) в ихтиофауне с целью

оценки возможности употребления ее в пищу; 3) прекращение или снижение воздействия промышленных предприятий и других источников загрязнения в бассейне р. Черной; 4) принятие дополнительных мер, включая инженерно-технические мероприятия, по уменьшению степени загрязнения со стороны автотранспорта на западном берегу озера через атмосферный перенос, поверхностный смыв и подземный сток загрязняющих веществ.

Summary

Opekunov A. Yu., Kiyko O. A., Avdyunichev V. V., Ivanova V. V. Results of geocological investigations of lake Sestroretsk Razliv.

The paper presents the results of geocological investigations of Lake Sestroretsk Razliv.

The procedure of the investigations was based on: (i) complex study of the section of bottom sediments; (ii) determination of the lake deposit thickness; (iii) laboratory analyses for the content of a wide range of contaminants in the sediments. The investigations were accompanied by analysis of the lithodynamic regime of the water basin and estimation of the level of the lake chemical contamination. The results obtained showed no marked degradation of the basin ecosystem: sedimentation indices are close to natural characteristics, contamination of bottom sediments is insignificant and localized in the vicinity of the main springs. The results of the investigations were used to propose a list of measures to ensure environmental safety for the inhabitants and keeping the lake ecosystem steady. The authors warn about the danger of the bottom dredging for the lake basin.

Литература

1. Кондратьев С. А., Гронская Т. П., Игнатьева Н. В. и др. Индикаторы состояния водоемов Санкт-Петербурга // Экологическая химия. 2000. Т. 9, № 4.
2. Беликов В. В. Тайны озера Разлив. СПб., 1999.
3. Опекун А. Ю., Холмянский М. А., Курilenko В. В. Введение в экогеологию шельфа: Учеб. пособие. СПб., 2000.
4. Иванов Г. И., Грамберг И. С., Крюков В. Д. Уровни концентраций загрязняющих веществ в придонной морской среде западно-арктического шельфа // Докл. РАН. 1997. № 3.
5. Опекун А. Ю. Экологическое нормирование. СПб., 2001.
6. Гидрохимическая характеристика качества вод системы Ладожское озеро — р. Нева — Финский залив / Отв. ред. С. А. Мельников, А. Н. Горшков. СПб., 1996.
7. Тарновский А. А. Геохимия донных отложений современных озер (на примере озер Карельского перешейка). Л., 1980.
8. Геоэкология Ладожского озера // Под ред. В. Л. Иванова, В. И. Гуревича. СПб., 1995.
9. Сает Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. и др. Геохимия окружающей среды. М., 1990.

Статья поступила в редакцию 23 февраля 2002 г.