



УДК 504.4.054, 504.064.3

Н. И. Куракина, С. Ю. Булганин  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Е. Г. Гридина  
Московский энергетический институт

## Пространственный анализ загрязнения акватории Финского залива в технологии ГИС

*Рассматриваются вопросы использования геостатистических методов интерполяции, позволяющих выполнять пространственный анализ распространения загрязняющих веществ в акватории Финского залива для выявления наиболее критических участков и организации эффективных мероприятий по охране окружающей среды и предотвращению чрезвычайных ситуаций. Созданная на базе ГИС ArcGIS ArcInfo обобщенная геоинформационная модель акватории, объединяющая данные, систему оценок и модели объектов, позволяет определить качество воды, исследовать динамику изменения концентраций загрязняющих веществ, наглядно представить результаты анализа на карте.*

### Мониторинг, пространственное моделирование, интерполяция, экологическая оценка, геоинформационные технологии, водные акватории, Финский залив

Невская губа и прилегающая к ней восточная часть Финского залива представляют собой уникальную эстуарийно-прибрежную экосистему, имеющую большое экономическое и геополитическое значение не только для города Санкт-Петербурга, но и для всего северо-запада России. Вместе с тем, уровень антропогенного воздействия на эти водные экосистемы заметно возрос за последние несколько лет.

Освоение прибрежных акваторий без научно обоснованного, системного подхода так, как оно происходит в настоящее время, угрожает невозполнимым ущербом биоресурсам и функционированию экосистемы в целом. Важнейшую роль в получении научно-обоснованных оценок влияния природных факторов, различных видов антропогенных воздействий и их комплекса на водные экосистемы в целях сохранения их функциональной целостности играет мониторинг. Мониторинговые исследования позволяют оценить состояние экосистемы в условиях антропогенных воздействий, сделать выводы о трендах изучаемых

параметров, рассчитать баланс этих веществ для экосистемы в целом или для отдельных ее частей.

Контроль загрязнения вод, биоты, донных отложений Финского залива имеет международное значение в связи с ключевой ролью Финского залива в экологическом состоянии восточной части бассейна Балтийского моря [1]. Недостатком совместных исследований в рамках международного сотрудничества стран Балтийского региона является разрозненность работ по мониторингу, отсутствие единой базы данных, а значит и сопоставимости полученных результатов и общего подхода к оценке состояния акватории.

Таким образом, особую актуальность приобретает задача создания современной системы комплексного мониторинга, обеспечивающей межуровневое информационное взаимодействие различных источников данных, систем обработки и представления эколого-аналитической информации, что возможно с использованием геоинформационных технологий.

Разработка на базе ГИС ArcGIS ArcInfo информационной системы экологической оценки и пространственного анализа загрязнения акватории Финского залива позволяет объединить пространственную и описательную информацию, систематизировать данные наблюдений, объединить базы моделей и систему оценок для наглядного представления экологической ситуации на карте, исследования динамики ее развития и предотвращения чрезвычайных ситуаций.

Оценка загрязнения выполнена на основе материалов натуральных наблюдений ФГУ «Балтийская дирекция по техническому обеспечению надзора на море» за гидрохимическим и геолого-экологическим режимом в Невской губе (восточной части Финского залива).

Геоинформационная система экологической оценки и пространственного анализа базируется: 1) на топографической основе, имеющей единую систему координат, 2) базах данных как хранителях всей информации об анализируемых объектах, имеющих единую организацию и структуру, 3) наборе программных модулей для получения оценок по ранее разработанным алгоритмам [2].

**Обобщенная геоинформационная модель акватории.** Обобщенная геоинформационная модель акватории [3], [4] служит основой анализа и включает модели природных и техногенных объектов, базу результатов контроля, нормативную базу, систему оценок.

К техногенным объектам относятся предприятия различного профиля, осуществляющие выбросы и сбросы загрязняющих веществ, а также различные гидротехнические сооружения, близлежащие транспортные магистрали и проч., т. е. объекты, оказывающие воздействие на акваторию. Геоинформационные модели природных объектов (залив, реки, озера, прибрежная зона, заповедники и т. д.) представляются в виде полигональных слоев. Например, водные объекты строятся на основе схем водосборов. Основной задачей при создании модели является выделение основных характеристик, описывающих состояние объекта и задание принципов деления пространственно-распределенных объектов на участки, в пределах которых их характеристики являются условно постоянными [5].

В основе системы оценки акватории Финского залива лежит база экологического контроля сети станций за весенний, летний и осенний периоды 2006–2010 гг., включающая наблюдения за такими характеристиками как:

– гидрометеорологические – температура и соленость (электропроводность) воды, прозрачность по диску Секки, температура воздуха, влажность, давление, скорость и направление ветра;

– геологические – наилок, его гранулометрический состав, редокс-потенциал;

– гидробиологические – зообентос, зоопланктон, фитопланктон, хлорофилл «а»;

– гидрохимические – содержание загрязняющих веществ – суммарных нефтепродуктов, тяжелых металлов, радионуклеидов, ртути, мышьяка, хлорогенических пестицидов.

Каждый замер сопровождается кодом поста наблюдения и датой.

Нормативная база представляет собой справочник основных загрязнителей со значениями ПДК для двух категорий водопользования: рыбохозяйственной и хозяйственно-питьевой, а также значениями классов опасности веществ и лимитирующих признаков вредности.

**Оценка экологического состояния акватории Финского залива.** Связь результатов контроля с географическими данными (постами наблюдения) позволяет выполнять пространственный анализ. Временная составляющая в результатах контроля дает возможность определять динамику и получать усредненные (среднесезонные, среднегодовые) характеристики, а нормативная база предоставляет нормированные показатели качества воды. Таким образом, в среде ГИС реализована система запросов для получения оценок по заданному перечню параметров в соответствии с функционалом нормирования величин и в зависимости от их нормативной функции [6], [7]:

$$O_i^* = \text{Fun}\{C_i^*, \text{Date}, \text{Stream}, \text{PDK}_i\}, i \in N,$$

где  $C_i$  – значение концентрации;  $\text{Date}$  – дата измерения;  $\text{Stream}$  – участок акватории ФЗ;  $\text{PDK}_i$  – значение ПДК;  $N$  – количество измеряемых параметров.

В результате анализа формируются слои оценок в составе геоинформационной модели.

Простые оценки не отражают комплексного состояния сложного объекта [5], [8]. С учетом того, что различные экологические факторы обладают эффектом «суммации», осуществляется расчет сложных оценок (удельного комбинаторного индекса загрязнения воды) по существующей стандартной методике:

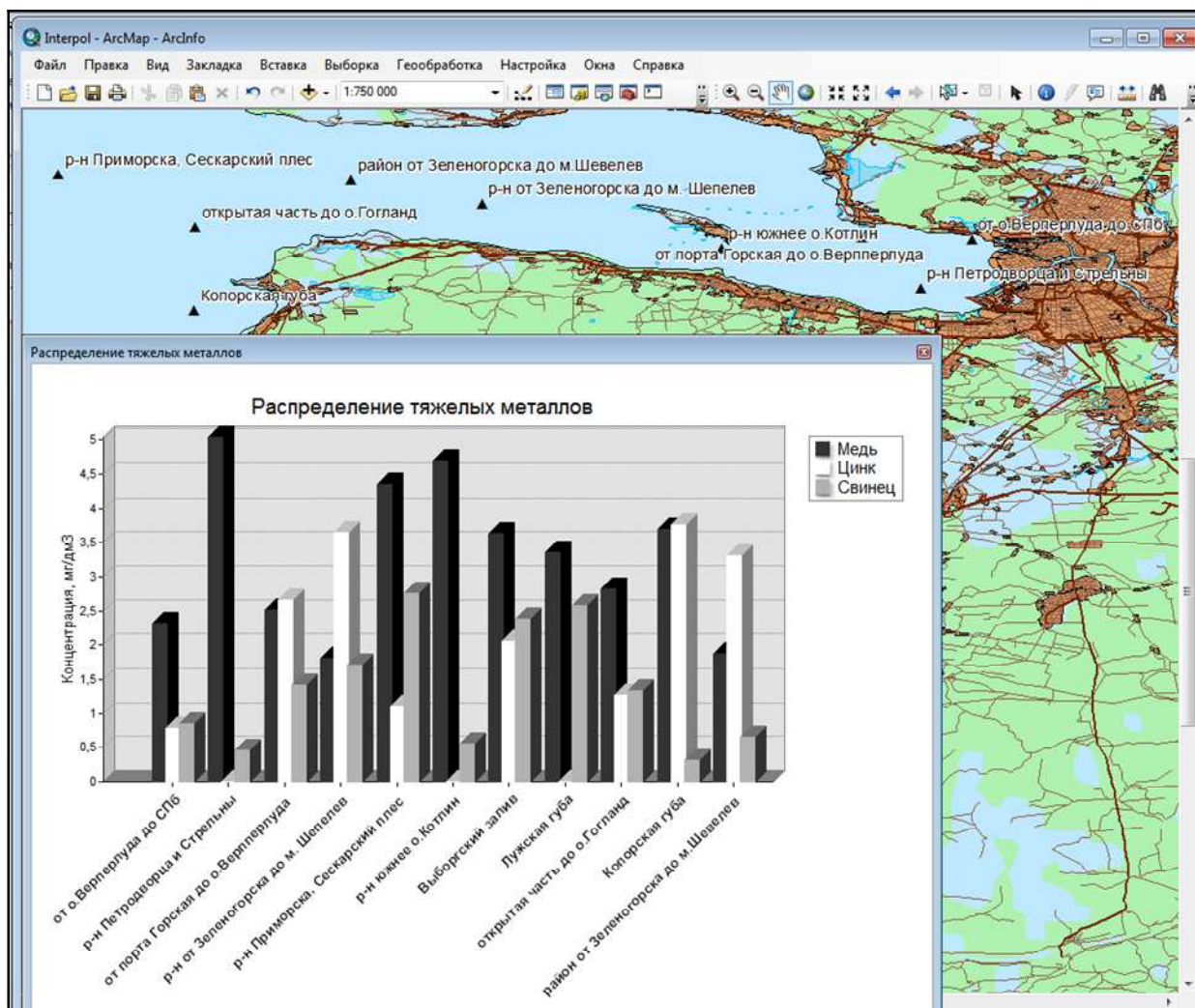


Рис. 1

$$S^* = \sum_i [O_i^*, Date, Stream, PDK_i], i \in I_s,$$

где  $O_i^*$  – простая оценка, входящая в множество важных характеристик  $I_s$ .

Как следует из полученных данных [9], акватория восточной части Финского залива в наибольшей степени загрязнена медью, кадмием, цинком и свинцом.

Содержание в природных водах тяжелых металлов обусловлено их поступлением в поверхностные воды в составе сточных вод предприятий текстильной, химической и металлообрабатывающей промышленности. Для открытой части Финского залива наиболее характерно загрязнение нефтепродуктами, а также увеличение концентраций алюминия и взвешенных веществ [9].

Распределение гидрохимических характеристик по глубине водного объекта показывает повышенное содержание в придонном горизонте тяжелых металлов (медь, цинк, железо) по сравнению с поверхностными водами. Это объясняет-

ся вторичным загрязнением природных вод в результате взаимодействия в системе вода–донные отложения (особенно в зонах размещения подводных отвалов грунта) [9].

По удельному комбинаторному индексу загрязнения класс качества воды в большинстве точек контроля характеризуется как загрязненный (3 класс, разряд «а»).

На рис. 1 представлены результаты оценки загрязнения Финского залива медью по данным за июль–август 2009 г. Наибольшее загрязнение наблюдается в районе Невской, Лужской губы, Петродворца, Стрельны и Приморска.

Однако одиночные результаты контроля в местах отбора проб не дают наглядной картины распространения загрязнения, не позволяют выявить тенденции развития ситуации и найти причины возможных превышений. В связи с этим при помощи модуля Geostatistical Analyst была разработана система пространственного моделирования загрязнения акватории [10].

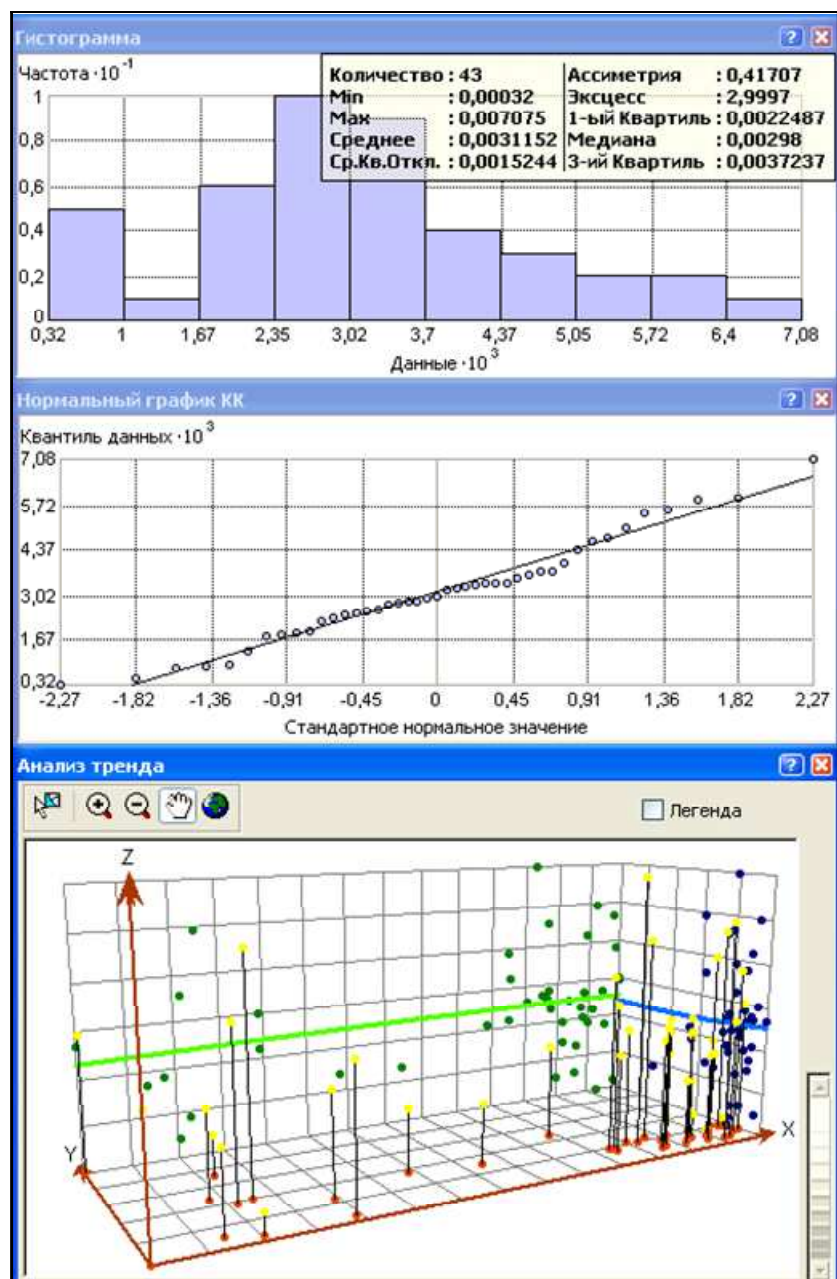


Рис. 2

**Пространственный анализ загрязнения акватории.** Данные гидрохимических наблюдений дискретны и, как правило, пространственно неоднородно распределены. Анализ данных и его результаты в значительной мере зависят как от качества и количества исходных данных, так и от методов и моделей обработки (интерполяции) данных. Существует 2 группы методов интерполяции: детерминистические и геостатистические. Геостатистические опираются как на статистические, так и на математические методы, которые могут быть использованы для построения поверхности и для оценки ошибки интерполяции. Данные без указания погрешностей мало пригодны

для принятия управленческих решений, поэтому геостатистические методы предпочтительнее.

Рассмотрим основные этапы пространственного моделирования загрязнения акватории Финского залива с использованием геостатистических методов.

При применении любой модели интерполяции встает вопрос о подборе оптимальных модельно-зависимых параметров. Выбор параметров опирается на пошаговое исследование характера и структуры данных.

*Исследование пространственной структуры данных.* При работе с пространственными данными важно прежде всего понять насколько эф-

фактивна имеющаяся сеть мониторинга. Для оценки этого используются различные характеристики, описывающие топологию сети. Первым и весьма важным этапом исследования является статистический анализ данных, позволяющий определить наличие ошибок и выбросов в данных, оценить базовые статистические закономерности и т. п. [10].

В качестве примера рассмотрим загрязнение Финского залива медью. По данным результатов контроля за 2009 г. была построена гистограмма (рис. 2), показывающая плотность распределения, а также определена статистика (среднее, медиана, стандартное отклонение, эксцесс).

При нормальном распределении среднее и медиана имеют близкие значения, асимметрия стремится к нулю, а эксцесс равен примерно 3. На основе полученной информации была выдвинута гипотеза об отличии закона распределения от нормального. Затем был построен график, который подтвердил уже появившуюся гипотезу об отличии распределения от нормального (рис. 2). Это означает, что при интерполяции данные необходимо дополнительно обработать. Для этого был использован метод степенного преобразования (Вох-Сох), в результате которого график распределения данных стал близок к нормальному.

Далее был выполнен структурный анализ данных для выявления тренда и пространственной автокорреляции между результатами контроля в постах наблюдений.

На трехмерной диаграмме исследуемой территории (рис. 2) точки проецируются на север и восток. Так как кривые, проходящие через спроецированные точки, на обеих плоскостях близки к прямой линии, сделано предположение, что тренд отсутствует.

Пространственная автокорреляция была исследована с помощью опции «облако вариограммы/ковариации» [4]. Эта функция количественно характеризует предположение, что чем ближе посты расположены друг к другу, тем результаты измерений в них более похожи. При определенном расстоянии облако вариограммы выравнивается, что указывает на то, что между парами постов за пределами этого расстояния нет корреляции.

*Выбор метода интерполяции.* Построение поверхностей распределения концентрации Си осуществлялось с использованием всех геостатистических методов интерполяции (ординарный, простой, универсальный, вероятностный, дизъюнктивный и индикаторный кригинги) [10].

*Оценка результирующей поверхности.* Оценка, насколько хорошо подобранная модель интерполирует значения в искомым точках, осуществляется в результате перекрестной проверки. Перекрестная проверка исключает из набора данных одну или несколько опорных точек с целью сравнения прінтерполированного и измеренного значения. В результате выполняется расчет ошибок интерполяции, по которому осуществляется оценка результирующей поверхности.

*Сравнение моделей.* Сравнение моделей позволяет определить, насколько модель, которая использовалась для создания геостатистического слоя, лучше, чем какая-либо другая. При сравнении моделей нужно искать ту, нормированная средняя ошибка которой ближе к нулю, а также имеющую наименьшую среднеквадратичную ошибку интерполяции, среднюю стандартную ошибку вычислений, ближайшую к среднеквадратичной ошибке интерполяции, и нормированную среднеквадратичную ошибку, значение которой ближе всего к единице.

Метод интерполяции	Ошибки				
	Средняя	Среднеквадратичная	Средняя стандартная	Средняя нормированная	Среднеквадратичная нормированная
Ординарный кригинг	-0.012	0.103	0.114	-0.0956	0.894
Простой кригинг	0.0001	0.127	0.129	-0.0001	0.981
Универсальный кригинг	-0.065	0.464	0.882	-0.0287	0.847
Вероятностный кригинг	-0.001	0.208	0.225	-0.0045	0.933
Индикаторный кригинг	-0.001	0.213	0.225	0.0030	0.954
Дизъюнктивный кригинг	0.0002	0.127	0.129	0.0005	0.978

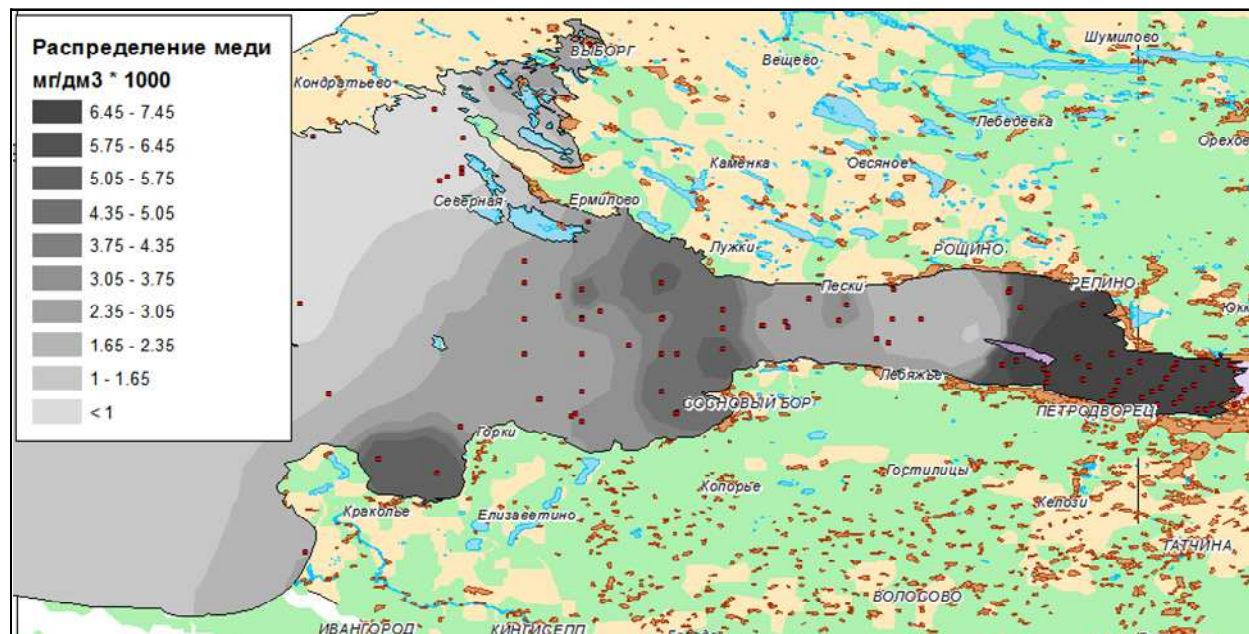


Рис. 3

По результатам анализа (таблица) оптимальным методом интерполяции значений загрязнения медью признан метод простого кригинга.

Поверхность пространственного распределения загрязнения Cu показана на рис. 3. Полученные результаты наглядно подтверждают, что наибольшему загрязнению подвергается район Невской, Лужской губы, район Приморска и район подводного отвала вблизи маяка Толбухин, что в сочетании с данными об увеличении мутности и гидробиологическими показателями качества воды [10] позволяет сделать выводы о негативном влиянии дноуглубительных и берегонамывных работ, а также складирования грунта в подводные отвалы, практикуемые в указанных районах акватории Финского залива.

Одним из путей минимизации негативных последствий является организация системы автоматизированного контроля за перемещением донных грунтов и состоянием природной среды, создание

карт интегральной экологической чувствительности гидросистемы, объединяющей данные о гидрологических и геологических условиях, гидрохимические характеристики загрязненности воды и грунта, состояние биоты и прибрежной растительности.

Созданная геоинформационная модель экологической оценки и пространственного анализа загрязнения акватории Финского залива инвариантна к объекту исследования и может быть применена и к другим водным объектам. Предложенные геостатистические методы интерполяции позволяют выявить и наглядно представить на карте наиболее загрязненные участки акватории, исследовать динамику изменения ситуации с целью определения наиболее опасных источников загрязнения, а также выработать рекомендации по организации действенного контроля и надзора за безопасностью недропользования и охраной окружающей среды на исследуемой акватории.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник рекомендаций Хельсинской комиссии: справ.-метод. пособие. СПб.: Диалог, 2008.
2. Бескид П. П., Куракина Н. И., Орлова Н. В. Геоинформационные системы и технологии. СПб.: Изд-во РГМУ, 2010.
3. Алексеев В. В., Куракина Н. И. Измерительные системы и ГИС-технологии. СПб.: Элмор, 2007.
4. Габидинова А. Р., Куракина Н. И. Информационная среда мониторинга и пространственного моделирования загрязнения водных акваторий на базе ГИС-технологий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 5. С. 92–98.
5. Система расчета нормативов допустимого воздействия на водные объекты в среде ГИС / В. В. Алексеев, Н. И. Куракина, Е. В. Желтов, А. И. Шишкин, Е. В. Епифанов, И. В. Антонов // ArcReview. 2009. № 4(51). С. 9–11.
6. Куракина Н. И., Микушина В. Н. Методика ведения мониторинга водных объектов на базе геоинформационных технологий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. № 9. С. 85–88.
7. Kurakina N. I. River Pollutants Monitored with GIS. Analyzing the Environmental Impact of Water Bodies in

Russia // GIS and Science: GIS Best Practices series. Redlands. Esri. 2008. P. 39–42.

8. Куракина Н. И., Куракин А. М., Лукин А. А. Мониторинг и комплексное оценивание береговой зоны Финского залива с использованием ГИС // Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности: сб. тр. XIII Междунар. конф. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2010. С. 225–227.

9. Куракина Н. И. Геоинформационная система мониторинга, оперативного контроля и простран-

ственного моделирования загрязнения Финского залива // День Балтийского моря: сб. материалов XVI Междунар. эколог. форума. СПб., 18–20 марта 2015 г. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2015. С. 157–159.

10. Пространственное моделирование загрязнения водных объектов / Н. И. Куракина, В. Н. Емельянова, С. А. Коробейников, Е. С. Никанорова // ArcReview. 2006. № 1 (36). С. 16–17.

---

N. I. Kurakina, S. Yu. Bulganin

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

E. G. Gridina

Moscow Power Engineering Institute

## SPATIAL ANALYSIS POLLUTION OF GULF OF FINLAND BASED ON GIS TECHNOLOGY

*There are considered questions of use geostatistical interpolation methods, that enable to realize spatial analysis pollution of Gulf of Finland based on geostatistic interpolation methods to identify the most critical areas and organization of measures to protect the environment and prevent emergencies. Generalized geoinformation model of water areas created based on GIS ArcGIS ArcInfo. This model combines the data, evaluation system, objects models and allows defining the water quality, exploring the dynamics of changes water pollutants, visualizing the environmental situation on the map.*

**Monitoring, spatial simulation, interpolation, environmental assessment, geoinformation technologies, water areas, Gulf of Finland**

---