
**Имитационное моделирование как средство решения проблем
рационального водопользования (на примере водной системы
Ладожского озера и Невской губы)**

Кондратьев С. А.

Институт озераедения РАН, Россия

Имитационное моделирование является единственным научно-обоснованным способом решения задач, выходящих за рамки возможного натурного эксперимента и позволяет во много раз сократить сроки и стоимость исследований, число занятых специалистов, повысить обоснованность принимаемых решений. При проведении имитационных расчетов вариации характеристик изучаемых процессов и внешних воздействий выражаются различными комбинациями входных величин и параметров. После этого задача сводится к анализу соотношений между входом и выходом модели. Итогом обычно являются количественные оценки естественного развития процесса или последствий антропогенных воздействий

Объектом настоящего исследования является крупнейшая пресноводная озерно-речная система Европы, включающая Ладожское озеро площадью 17870 км² с объемом водной массы 838 км³, его водосборный бассейн площадью около 280000 км² и замыкающаяся на Невскую губу Финского залива. Ладожское озеро является безальтернативным источником питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга, водные ресурсы озера и его водосборного бассейна играют важную роль в обеспечении жизнедеятельности населения и функционирования промышленности и сельского хозяйства северо-западного региона России. Сток из Ладожского озера происходит по реке Неве, которая впадает в Невскую губу Финского залива, являющуюся мелководным пресноводным водоемом, отделенным от восточной части Финского залива комплексом защитных гидротехнических сооружений. Невская губа с площадью водосбора 400 км² и объемом водной массы 1,6 км³, принимает сток с 67% площади водосбора всего Финского залива. Состояние Невской губы в значительной степени определяет экологическую ситуацию в Санкт-Петербурге и его пригородах.

Основной экологической проблемой, как Ладожского озера, так и Невской губы является эвтрофирование, причина которого заключается в обогащении вод биогенными элементами как природного, так и, главным образом, антропогенного происхождения. Возникает дисбаланс в соотношении продукционно-деструкционных процессов в водоеме. Вода становится мало пригодной для использования не только в питьевых, но нередко и в хозяйственных целях. В рассматриваемой водной системе фактором, лимитирующим процесс эвтрофирования, является содержание фосфора в водной массе.

В настоящем исследовании имитационное моделирование используется для решения двух задач, связанных с научным обоснованием концепции рационального использования и охраны водных ресурсов изучаемой водной системы:

1. Оценки зависимости содержания общего фосфора ($P_{общ}$) в воде Ладожского озера от уровня фосфорной нагрузки.
2. Оценки воздействия выноса $P_{общ}$ из Ладожского озера и сбросов сточных вод Санкт-Петербурга на фосфорный режим Невской губы.

Средством решения поставленных задач является математическая модель баланса $P_{общ}$ в водной системе Ладожского озера, Невской губы и их водосборного бассейна, разработанная в Институте озероведения РАН. Модель верифицирована на материалах натурных измерений концентраций $P_{общ}$ в Ладожском озере и Невской губе. В качестве входной информации для моделирования использовались данные, полученные в результате выполнения многолетних полевых исследований Института озероведения РАН, материалы Петербургкомстата, форм статистической отчетности 2ТПВодхоз, данные ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», а так же результаты совместных Российско-Финских исследований водосбора Ладожского озера.

Для оценки зависимости содержания $P_{общ}$ в воде Ладожского озера от уровня антропогенной нагрузки проведена серия имитационных расчетов, заключающихся в следующем:

1. Значение поступления $P_{общ}$ с водосбора в Ладожское озеро принималось равным 1000, 2000, 3000, 5000 и 10000 т год⁻¹. Расчеты выполнялись для интервала времени 40 лет с шагом по времени $\Delta t = 1$ год при начальном условии $C = 0$ мг $P_{общ}$ л⁻¹ в воде озера.
2. Расчеты проводились с использованием реальных значений входных величин и параметров, принятых при верификации модели для интервала времени с 1980 по 2006 гг. Затем для периода с 2007 по 2020 гг. имитировались следующие уровни фосфорной нагрузки от точечных источников на водные объекты российской части водосбора: сохранение нагрузки на уровне 2006 года ($L = 615$ т $P_{общ}$ год⁻¹), ее двукратное, трехкратное, пятикратное и десятикратное увеличение (1230, 1845, 3075 и 6150 т $P_{общ}$ год⁻¹, соответственно).

По результатам моделирования проводились сравнение и анализ значений нагрузки на Ладожское озеро и содержания $P_{общ}$ в воде озера, рассчитанных при различных заданных сценариях поступления $P_{общ}$. В результате обработки результатов получена эмпирическая линейная зависимость значений установившейся концентрации $PP_{общ}$ в Ладожском озере (мкг л⁻¹) от нагрузки с водосбора L (т год⁻¹) в следующем виде: $C_{P_{общ}} = 3.0 + 0.00331L$.

Результаты расчетов значений концентрации $P_{общ}$ в Ладожском озере с использованием реальных значений входных величин и параметров с 1980 по 2005 гг., а затем для периода с 2006 по 2020 гг. в предположении об сохранении нагрузки $P_{общ}$ от точечных источников на уровне 2005 года (615 т год^{-1}), ее двукратном, трехкратном, пятикратном и десятикратном увеличении, приведены на рис. 1.

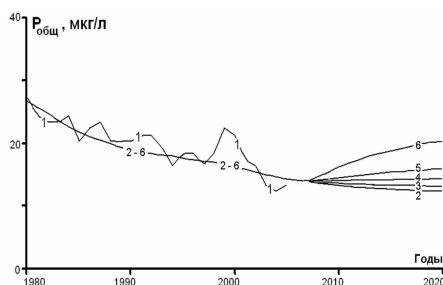


Рис. 1. Возможные изменения содержания $P_{общ}$ в воде Ладожского оз. при изменении уровня нагрузки от точечных источников загрязнения на российскую часть водосбора: измеренные концентрации (1), рассчитанные значения концентраций при условии сохранения нагрузки на уровне 2005 г. (2), ее двукратном (3), пятикратном (4) и десятикратном (5) увеличении.

При решении второй из поставленных задач, то есть при оценке воздействия выноса $P_{общ}$ из Ладожского озера и сбросов сточных вод Санкт-Петербурга на фосфорный режим Невской губы использовался план совершенствования водоочистки Санкт-Петербурга, разработанный ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». Выполнена серия имитационных расчетов, заключающихся в следующем:

1. Расчеты нагрузки $P_{общ}$ на Ладожское озеро и Невскую губу, а также концентраций в них $P_{общ}$ выполнялись по имеющимся фактическим данным до 2005 г. На период до 2020 г. расчеты выноса $P_{общ}$ из озера со стоком реки Невы велись при условии сохранения уровня нагрузки на озеро и его водосбор за 2005 г. Сбросы $P_{общ}$ с городскими сточными водами в Невскую губу принимались в соответствии с планом водоочистки ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».
2. Сбросы $P_{общ}$ с городскими сточными водами в Невскую губу на период до 2020 принимались как в соответствии с планом водоочистки ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», так и с учетом различных сценариев возможных усовершенствований системы водоочистки, предлагаемых главным образом зарубежными специалистами.

3. По результатам расчетов проводилось сравнение вкладов Санкт-Петербурга и притока из Ладожского озера в формирование фосфорной нагрузки на Невскую губу, а также изменений возможного содержания $P_{общ}$ в губе на период до 2020 г. в зависимости от сценариев водоочистки.

Полученные данные свидетельствуют о том, что вклад Санкт-Петербурга в нагрузку $P_{общ}$ на Невскую губу весьма существенен. Так, в 2005 году сброс $P_{общ}$ со сточными водами Санкт-Петербурга приблизительно составил 1800 т год⁻¹. Тогда как со стоком реки Невы в Невскую губу поступило согласно расчетам около 1500 т $P_{общ}$ год⁻¹, из них вынос из Ладожского озера составил 1300 т $P_{общ}$ год⁻¹.

Следующий этап имитационных расчетов связан с прогнозом изменения содержания $P_{общ}$ в Невской губе в зависимости от сценариев водоочистки. Рассмотрены следующие возможные сценарии:

1. Реализуется план водоочистки ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» при сохранении постоянной нагрузки $P_{общ}$ на водосборы Ладожского озера и реки Невы.
2. Реализуется план водоочистки ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» по объемам сброса, на выходе всех городских очистных сооружений концентрация составляет 1.5 мг л⁻¹ (в соответствии с нормативами ХЕЛКОМ).
3. Реализуется план водоочистки ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» по объемам сброса, на выходе всех городских очистных сооружений концентрация составляет 1.0 мг л⁻¹ (в соответствии с нормативами ЕС).
4. Реализуется план водоочистки ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» по объемам сброса с доочисткой сточных вод на всех городских очистных сооружениях до 0.8 мг л⁻¹.
5. Очистка сточных вод в Санкт-Петербурге не производится и сбросы осуществляются с концентрацией 3.2 мг $P_{общ}$ л⁻¹.

Результаты расчетов, выполненных с учетом перечисленных сценариев водоочистки сточных вод Санкт-Петербурга, приведены в табл. 3. Реализация плана водоочистки ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» должна привести в 2020 году к снижению содержания $P_{общ}$ в Невской губе на 21 % по отношению к уровню 2005 года. Выполнение нормативов ХЕЛКОМ по очистке сточных вод до 1.5 мг $P_{общ}$ л⁻¹ на всех очистных сооружениях Санкт-Петербурга приведет к снижению содержания $P_{общ}$ в Невской губе к 2020 году всего на 14 % по отношению к 2005 году, что несколько хуже результатов реализации плана ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». Доочистка сточных вод на

всех городских очистных сооружениях до $1.0 \text{ мг } P_{\text{общ}} \text{ л}^{-1}$ позволит снизить содержание общего фосфора на 29 %. Дополнительная доочистка до $0.8 \text{ мг } P_{\text{общ}} \text{ л}^{-1}$ приведет с дальнейшему снижению значений концентрации $P_{\text{общ}}$ в Невской губе до 23.9 мг м^{-3} , что на 35 % ниже значения концентрации, рассчитанной для условий 2005 года. Выполнены также расчеты по оценке возможного содержания $P_{\text{общ}}$ в Невской губе при условии выхода из строя всех очистных сооружений Санкт-Петербурга. В этом случае концентрация достигнет 51.5 мг м^{-3} , что на 40 % выше значений 2005 года.

Таким образом, полученные результаты являются наглядным подтверждением перспективности использования имитационного моделирования для решения задач, связанных с оценкой и прогнозом возможных изменений водных экосистем под влиянием антропогенных воздействий. Ни одна из рассмотренных выше задач не может быть решена на основе использования только данных натурных измерений. В то же время обоснованность сделанных оценок подтверждена положительными результатами верификации модели. Полученные результаты позволяют судить об уровне возможных изменений Ладожского озера и Невской губы, а так же об эффективности реализации различных сценариев совершенствования способов очистки сточных вод Санкт-Петербурга. Они могут служить основой для принятия решений в области рационального водопользования и охраны водных объектов и, в том числе, по внедрению новых и дорогостоящих технологий очистки сточных вод от фосфора на очистных сооружениях Санкт-Петербурга.