

УДК [556.555.6:556.56].072

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ  
И ТРАНСПОРТА НАНОСОВ В ВОДОЕМЕ ПРИ НАЛИЧИИ  
МАКРОФИТОВ (НА ПРИМЕРЕ СЕСТРОРЕЦКОГО РАЗЛИВА)**

*М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев*

Институт озераведения РАН, m-shmakova@yandex.ru

Высшая водная растительность оказывает влияние на динамику водных масс, вследствие чего происходит перераспределение твердого вещества в акватории водоема. В работе приводятся результаты сравнения значений скорости течений и расходов наносов без учета влияния водной растительности и с учетом таковой для периода межени по результатам математического моделирования.

**Ключевые слова:** моделирование, водохранилище, макрофиты.

**HYDRODYNAMIC MODELING OF CURRENTS AND SEDIMENT  
TRANSPORT IN RESERVOIR WITH MACROPHYTES  
(SESTRORETSKY RAZLIV AS A CASE STUDY)**

*M. V. Shmakova, S. A. Kondratyev*

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences

Higher water vegetation influences the dynamics of water masses and, as a consequence, affects transport of sediments in the aquatic area of the reservoir. The paper presents the results of a comparison of calculated values of flow velocities and sediment flow rates without taking into account the influence of aquatic vegetation and taking it into account for the low water period.

**Keywords:** modeling, reservoir, macrophytes.

Цель настоящего исследования — оценка влияния зарослей макрофитов на поля течений и интенсивности осадконакопления в мелководном водоеме методами математического моделирования на примере Сестрорецкого Разлива. В основу методов положены двумерная гидродинамическая модель водоема и аналитическая формула общего расхода наносов. Работа является продолжением исследований по оценке среднегодовых значений заиления Сестрорецкого Разлива [4, с. 134] и выявлению пространственно-временных закономерностей заиления изучаемого водохранилища [5, с. 61].

**Влияние высшей водной растительности на динамику водных масс**

Одним из важных составляющих гидравлических сопротивлений водных потоков является водная растительность. Макрофиты могут оказывать определяющее влияние на динамику водных масс неглубоких водоемов. Основными характеристиками этого влияния являются тип и зрелость растений, площадь заросшей акватории, глубина водоема в месте зарастания. Заросшие участки акватории, с одной стороны, уменьшают проточность, задерживая и перенаправляя водные массы, а с другой стороны, задерживая и твердый сток, провоцируют образование отмелей, что приводит к увеличению заросшей макрофитами площади.

Например, как только появляется и закрепляется камыш, наносы (как взвешенные, так и влекомые) задерживаются в камышовых зарослях и ускоряют рост камышовых островов, убыстряя обмеление. Однако даже при слабо выраженном течении воды в плотной массе растительности могут образовываться относительно чистые транзитные «коридоры» с выраженными перепадами уровней.

Различные типы макрофитов могут неоднозначно влиять на динамику потока. «При увеличении скорости течения растения, имеющие упругий стебель (камыш, тростник, хвощи и т.п.), изгибаются под напором потока и, начиная вибрировать, несколько уменьшают сопротивления. Стелющиеся растения (рдесты, остролисты и т.п.) прижимаются течением ко дну, создавая плотный ковер и уменьшая тем самым гидравлические сопротивления. Растения с плавающими листьями (кувшинки, лилии, кубышки) при повышении уровня воды резко увеличивают сопротивления за счет значительного тормозящего действия погрузившихся листьев» [1, с. 107].

В гидравлических расчетах и гидродинамическом моделировании влияние растительности традиционно учитывается увеличением параметра трения в выражении, описывающем взаимодействие потока и дна. При представлении сопротивления потока дну коэффициентом Шези увеличивают параметр шероховатости  $n$ . Для рек болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода) И.Ф. Карасев [2, с. 119] рекомендует значение коэффициента шероховатости  $n$  принимать равным 0,14.

### **Водохранилище Сестрорецкий Разлив и его водная растительность**

Водохранилище Сестрорецкий Разлив создано на р. Сестре вблизи ее устья в 1723 г. для нужд Сестрорецкого оружейного завода. Площадь зеркала водоема составляет 10,03 км<sup>2</sup>, средняя глубина — около 2 м, площадь водосбора — 566 км<sup>2</sup>. Основными притоками Сестрорецкого Разлива являются реки Сестра (площадь водосбора 399 км<sup>2</sup>) и Черная (126 км<sup>2</sup>), сток из водохранилища осуществляется через водосливной канал.

Значительная часть акватории Сестрорецкого Разлива заросла высшей водной растительностью, главным образом камышом и хвощом. Всего в процессе геоботанических работ на водоеме обнаружен 51 вид высших растений, из них пять видов гидатофитов, шесть видов нейстофитов, 16 видов гелофитов и 24 вида гигрофитов. Эдификаторами растительного покрова Сестрорецкого Разлива из гелофитов являются тростник обыкновенный, камыш озерный и хвощ приречный, из нейстофитов — горец земноводный, рдест плавающий, кувшинка чисто-белая и кубышка желтая, из погруженных растений — только рдест пронзеннолистный [3, с. 137]. На рис. 1 приведена схема расположения макрофитов в акватории водохранилища, построенная на основе информации, любезно предоставленной А.Г. Русановым (лаборатория гидробиологии ИНОЗ РАН). На рисунке выделены области с типовой растительностью и назначены параметры шероховатости для каждого типа.

### **Моделирование динамики водной массы и транспорта наносов с учетом водной растительности**

Для моделирования влияния высшей водной растительности на динамику водных масс использована разработанная ранее программа «Гидродинамическая

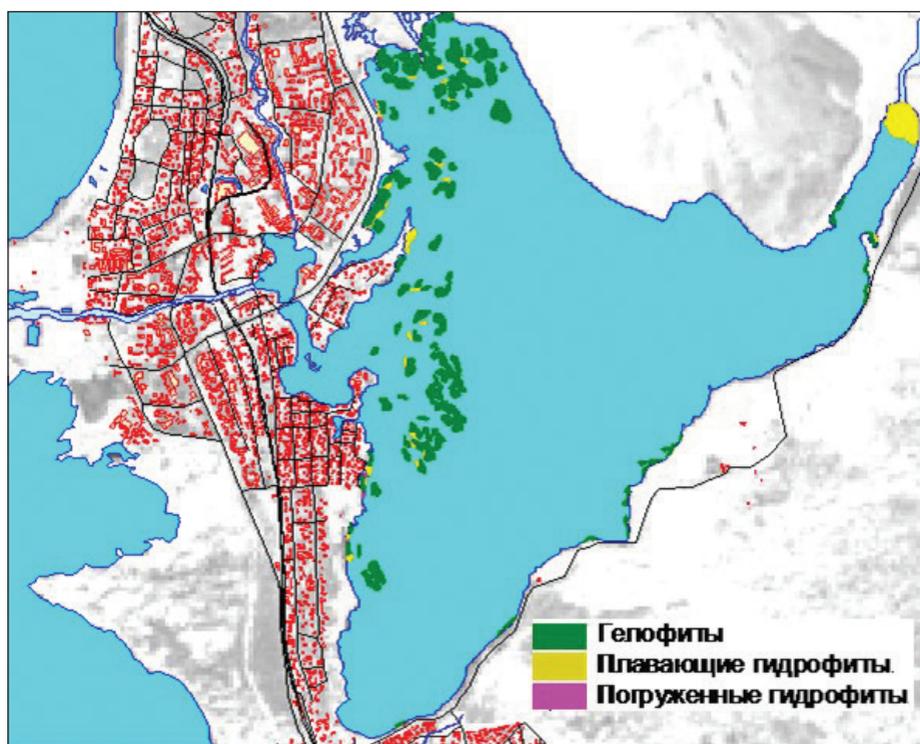


Рис. 1. Схема расположения макрофитов в акватории водохранилища.

модель водоема» [4, с. 61], которая была дополнена соответствующими возможностями для ввода информации о полях и типах растительности. Расчеты проводились для периода межени, когда расходы воды в основных притоках водохранилища рек Сестра и Черная составляют 2 и 0,5 м<sup>3</sup>/с соответственно.

Согласно схеме, приведенной на рис. 1, и значениям коэффициентов шероховатости, принятым в соответствии с рекомендациями И.Ф. Карасева (для гелофитов  $n = 0,14$ , для плавающих гидрофитов  $n = 0,2$ ), были получены плановая картина течений в акватории Сестрорецкого Разлива (рис. 2) и поле значений скорости течения  $V$  (рис. 3 а) для периода межени. В сравнении с планом течений, рассчитанным в условиях отсутствия растительности, направления скорости водных масс в целом остались неизменны. Однако скорость течения в местах произрастания макрофитов — в устьях рек Черная и Сестра, а также на протяжении транзитного течения водных масс притоков — изменилась незначительно: ее значения уменьшились на несколько процентов от среднего значения скорости течения. На рис. 3 б приведено поле разности значений скорости течения  $\Delta V$  (м/с) при отсутствии водной растительности и с учетом таковой для периода межени.

Изменение скорости течения при вводе растительности в модель также оказало влияние на величину общего расхода наносов  $G$ . На рис. 4 а приведено поле общего расхода наносов в акватории в период межени при наличии макрофитов

в акватории. Максимальное значение расхода наносов в местах впадения притоков сохранилось и составило несколько граммов в секунду.

На рис. 4 б приведено поле разности общего расхода наносов  $\Delta G$  (кг/с) без влияния водной растительности и с учетом таковой для периода межени. Изменение значений общего расхода наносов также составляет несколько процентов от среднего значения расхода наносов.

### Выводы

Таким образом, результаты проведенных имитационных расчетов показали, что высшая водная растительность оказывает некоторое влияние на изменение скорости течения и расхода наносов в поле транзитного переноса, а разработанная математическая модель позволяет учесть указанный эффект. В среднем эти изменения для скорости течения в изучаемой акватории и общего расхода наносов не превышают нескольких процентов от среднего значения указанных величин.

Следует заметить, что произрастание макрофитов и интенсивность осадко-накопления взаимосвязаны. Задерживаясь в местах скопления макрофитов (места с повышенным значением шероховатости в модели), часть наносов осаждается,

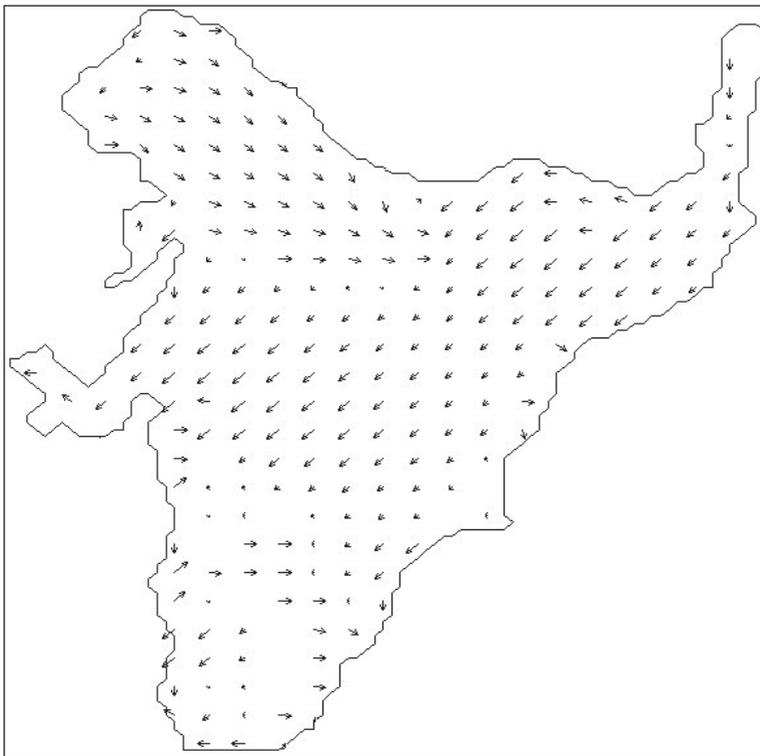


Рис. 2. Плановая схема течений в акватории Сестрорецкого Разлива при стационарном режиме расчета.

уменьшая тем самым глубину. Уменьшение глубины, в свою очередь, приводит к тому, что толща воды лучше прогревается и формируются более благоприятные условия для произрастания макрофитов. Обильные заросли макрофитов более

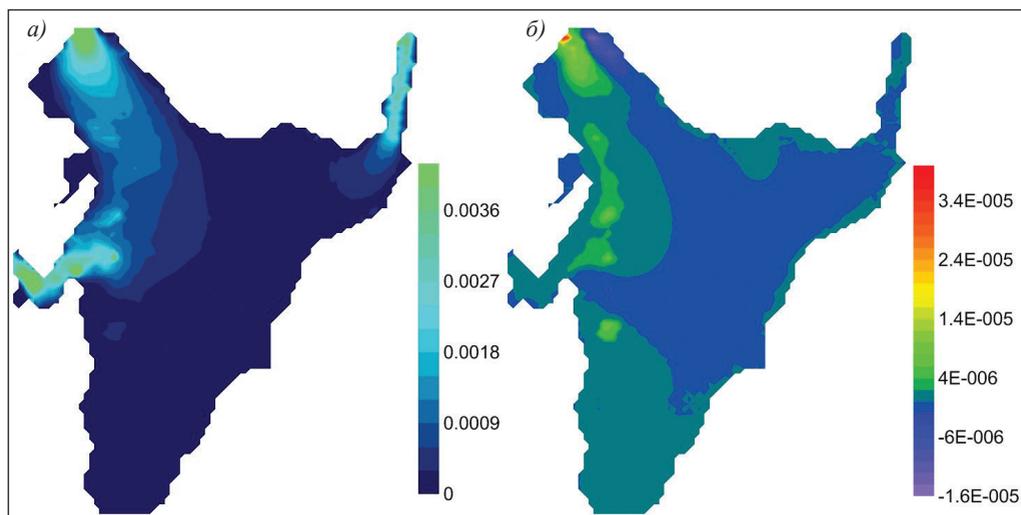


Рис. 3. Распределение скорости течения  $V$ , м/с (а) в акватории Сестрорецкого Разлива в межень при наличии водной растительности, а также распределение изменения скорости течения  $\Delta V$ , м/с (б).

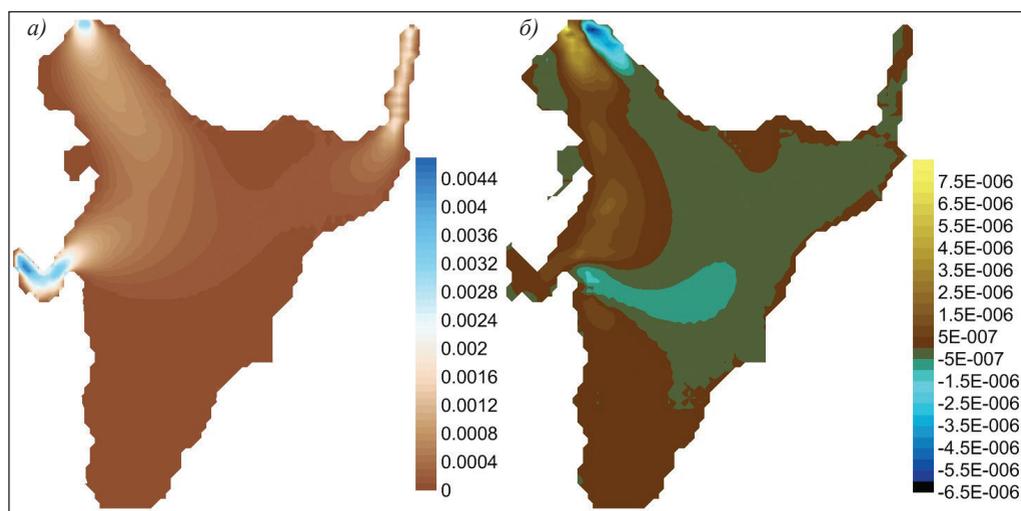


Рис. 4. Распределение расхода наносов  $G$ , кг/с (а) в акватории Сестрорецкого Разлива в межень при наличии в акватории растительности, а также распределение изменения расхода наносов  $\Delta G$ , кг/с (б).

продуктивно тормозят транзитный поток, задерживая переносимые наносы, и т.д. Разработанная модель адекватно описывает взаимосвязанные процессы зарастания макрофитами и обмеления заросших водной растительностью участков акватории Сестрорецкого Разлива.

*Список литературы*

1. *Барышников Н.Б.* Гидравлические сопротивления речных русел. — Л.: изд-во РГГМУ, 2003. 147 с.
2. *Карасев И.Ф.* Руслые процессы при переброске стока. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. 268 с.
3. *Распопов И.М.* Высшая водная растительность водохранилища Сестрорецкий Разлив в Курортном районе г. Санкт-Петербурга // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2010. Т. 19, № 3. С. 133—139.
4. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А.* Оценка заиления водохранилищ по данным о годовом твердом стоке притоков (на примере Сестрорецкого Разлива) // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 34. С. 134—141.
5. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А., Маркова Е.Г.* Пространственно-временные закономерности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами (по результатам математического моделирования) // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 61—69.