

СТОК НАНОСОВ И МУТНОСТЬ ВОДЫ ОСНОВНЫХ ПРИТОКОВ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев

E-mail: m-shmakova@yandex.ru

*Институт озераведения Российской академии наук, ФГБУН
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской
академии наук» (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ: Обширный водосбор Ладожского озера характеризуется многообразием типов подстилающей поверхности и сложной гидрографической сетью. Процессы эвтрофирования южных литоральных областей озера определяют актуальность оценки выноса твердого вещества рек в устьевые области притоков Ладоги. Наблюдения за стоком наносов основных притоков Ладожского озера не проводились, поэтому для каждого притока были подобраны реки-аналоги.

В основу моделирования годового твердого стока и мутности воды притоков Ладоги положены аналитическая формула расхода наносов и стохастическая модель годового твердого стока. По проведенным расчетам поступающий в акваторию Ладоги годовой сток наносов составляет около 432 тыс. т/год. Основными источниками наносов являются реки Свирь, Волхов и Вуокса, на долю которых приходится 253 тыс. т/год или 59 % от общего количества поступивших в озеро наносов. Однако на эти же водотоки приходится и наименьший годовой модуль твердого стока, что объясняется удержанием наносов зонами подпора перед плотинами ГЭС на реках и, как следствие, уменьшением общего расхода наносов. При этом средний по водосбору Ладожского озера годовой модуль твердого стока равен 1,53 т/(км²·год), что соответствует проведенной ранее оценке. Анализ годового модуля твердого стока показал хорошее соответствие полученных значений и условий формирования твердого стока на водосборе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: расход наносов, река, Ладожское озеро, водосбор, моделирование, мутность воды, модуль твердого стока.

Финансирование: Работа выполнена за счет средств федерального бюджета в рамках темы № 0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Литоральная зона глубоководных озер расположена на стыке двух природных комплексов – наземного и водного [1] и характеризуется активными гидродинамическими процессами. Турбулентное и конвективное перемешивание водных масс исключает их устойчивость и длительную

стратификацию, что определяет физические, химические и биологические процессы литоральной зоны [1]. При этом, мелководная область литорали, интенсивное прогревание в вегетационный период, биогенный сток с водосборной площади формируют благоприятные условия для развития процессов эвтрофирования. Для биоценозов литоральной зоны больших озер северо-запада России определяющими факторами являются динамичность водной массы и характер донных отложений [1, 2]. Концентрация взвешенных веществ (или мутность воды) в литоральной зоне озера при инициации гидродинамических процессов взмучивания определяет прозрачность воды и, как следствие, проникновение света, интенсивность прогревания, а также сорбционные процессы и интенсивность фотосинтеза. Все это влияет на качество воды и жизнедеятельность водных организмов. Помимо отрицательного механического воздействия на экосистемы водных объектов взвешенные вещества выступают и в качестве источника вторичного загрязнения водоема, являясь адсорбентами высокотоксичных поллютантов [3].

Сложно переоценить значение Ладожского озера как географического объекта и хозяйственную востребованность его водосборной площади ведущими отраслями экономики северо-западного региона Российской Федерации и Финляндии. Хозяйственная освоенность водосбора Ладоги с 1970-х годов привела к интенсификации процессов эвтрофирования мелководных областей акватории Ладожского озера в местах впадения его основных притоков. Согласно исследованию [4], большинство литоральных станций Ладожского озера характеризуются мезотрофным (11 станций) и эвтрофным (12 станций) трофическим статусом и только две относятся к олиготрофным [4]. Наиболее эвтрофированная область расположена в южной части Ладожского озера в месте влияния вод р. Волхов. Кроме того, южная часть озера и Волховская губа подвержены интенсивному заилению, которое приводит к необходимости регулярной очистки судоходных фарватеров. Все это определяет актуальность оценки выноса твердого вещества со стоком рек в устьевые области притоков Ладожского озера.

Целью данной работы является оценка стока наносов притоков Ладожского озера по данным наблюдений за твердым стоком на реках-аналогах.

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обширный водосбор Ладожского озера характеризуется многообразием типов подстилающей поверхности и сложной гидрографической сетью. Северная часть водосбора приходится на область распространения Балтийского кристаллического щита, характеризующегося гранитами и гней-

сами [5]. Эта часть водосбора насыщена большим количеством озер и болот. Озера оказывают регулирующее влияние на сток наносов, осаждая их в своей толще вследствие замедленного водообмена. С юга к Балтийскому кристаллическому щиту примыкает Русская равнина, сложенная глинами, известняками, песчаниками и доломитами [5]. Эта территория также характеризуется большим процентом заболоченных земель, но меньшей, в сравнении с северной частью, озерностью [5]. Всего на водосборе Ладожского озера выделяется четыре частных водосбора – Ильмень-Волховский, Онежско-Свирский, Саймо-Вуоксинский и частный водосбор Ладожского озера [6]. Каждый из этих водосборов имеет свои физико-географические особенности, определяющие интенсивность почвенной эрозии и условия формирования твердого стока [6].

Общая площадь водосбора основных притоков Ладожского озера (табл. 1) составляет 248 232 км², что соответствует 88 % площади водосбора Ладожского озера (282 700 км²). Таким образом, продукты почвенной эрозии водосбора и русловых переформирований поступают в акваторию водоема преимущественно со стоком притоков. Схема расположения основных притоков Ладожского озера, для которых оценивались сток наносов и мутность воды, приведена на рис. 1.

Таблица 1. Основные притоки Ладожского озера и их характеристики
Table 1. Main tributaries of the Lake Ladoga and their characteristics

Приток	Длина водотока, км	Площадь водосбора, км ²	Среднегодовой расход воды, м ³ /с	Средний уклон водотока, б/р
Вуокса	143	68 501	645	0,00043
Янисйоки	95	3861	45,5	0,00065
Видлица	67	1320	11,8	0,001087
Олонка	87	2620	35,0	0,00076
Свирь	224	84 400	790	0,000134
Сясь	260	7330	63,7	0,00093
Волхов	224	80 200	590	0,0000625

Наблюдения за стоком наносов на притоках Ладожского озера не проводились. Исключение составляют эпизодические непродолжительные наблюдения на гидрометрических створах р. Олонка – г. Олонец (1953 и

1956 гг.) и р. Свирь – с. Мятусово (1945 и 1948 гг.), которые не могут быть приняты за основу оценки твердого стока. Поэтому для каждого притока были подобраны реки-аналоги, основными критериями соответствия при выборе которых послужили уклон, крупность донных отложений и площадь водосбора (табл. 2). На гидрометрическом створе р. Олонка – г. Олонец проводились редкие наблюдения за твердым стоком, в основном охватывающие период межени и средней водности. Для периода большой водности для этого водотока также назначен створ-аналог.

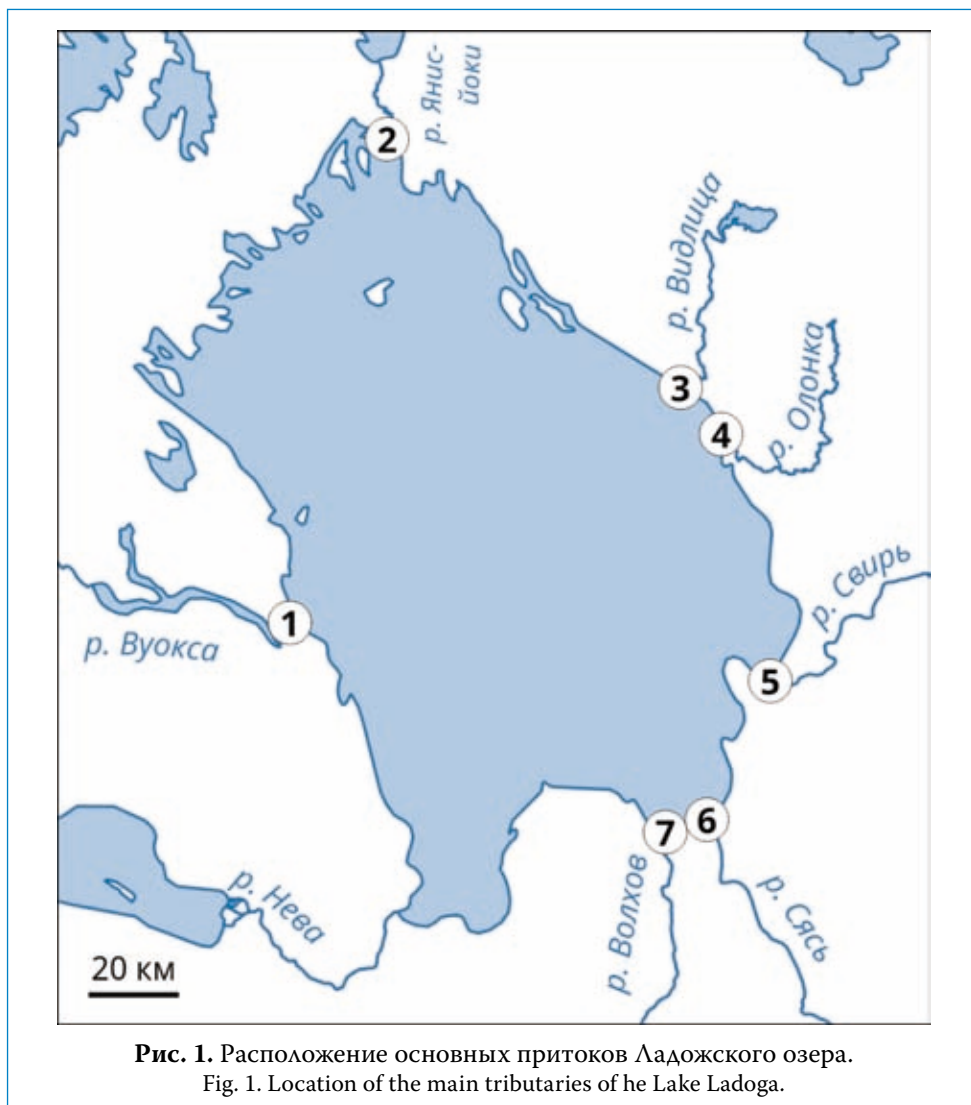


Таблица 2. Основные притоки Ладожского озера и их аналоги
Table 2. Main tributaries of the Lake Ladoga and their analogs

Реки и гидрометрические створы		Площадь водосбора, км ²		Уклон I, б/р		Донный грунт в створе	
притоки Ладожского озера	реки-аналоги	приток Ладоги	река-аналог	приток Ладоги	река-аналог	приток Ладоги	река-аналог
Вуокса – ХГЭС	р. Мста – с. Березовский Рядок	61 500	5180	0,000430	0,00066	песок, галька, валуны	галька
Янисйоки – пос. Хямекоски	р. Мста – с. Березовский Рядок	3650	5180	0,00065	0,00066	камни, галька	галька
Видлица – с. Б. Горы	р. Паша – с. Часовенское	977	5710	0,001087	0,0009	песок	песок
Олонка – г. Олонец	р. Мга – д. Горы	2120	709	0,00076	0,00061	песок, валуны	песок, галька
Свирь – XII ГЭС	р. Нева – г. Петрокрепость	67100	–	0,000134	0,0005	песок, ил	песок, камни
Сясь – д. Яхново	р. Оять – д. Шангиничи	6230	4930	0,00093	0,00097	песок, валуны	песок
Волхов – VI ГЭС	р. Нева – г. Петрокрепость	79 800	–	0,0000625	0,0005	песок, гравий, валуны	песок, камни

Расчеты твердого стока и мутности воды притоков проводили по методам и моделям, разработанным в ИНОЗ РАН (аналитическая формула общего расхода наносов [7] и стохастическая модель годового твердого стока [7]). Аналитическая формула расхода наносов и формула мутности воды имеют вид [7, 8]:

$$G = \frac{\rho_{гр}}{\rho_{гр} - \rho_{в}} Q \left[\frac{c}{hg} - (1 - f)\rho_{в} I \right], \quad (1)$$

$$S = 10^3 \frac{G}{Q} = 10^3 \frac{\rho_{гр}}{\rho_{гр} - \rho_{в}} \left[\frac{c}{hg} - (1 - f)\rho_{в} I \right], \quad (2)$$

где G – общий расход наносов, кг/с;

S – мутность воды, г/м³;

Q – расход воды, м³/с;

$\rho_{гр}$ и $\rho_{в}$ – плотность грунта и воды соответственно, кг/м³;

I – уклон дна, б/р;

h – средняя глубина потока, м;

f – коэффициент внутреннего трения, б/р (допускается значение $f > 1$);

c – сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²);

g – ускорение свободного падения, м/с².

Параметры f и c формул (1) и (2) зависят от фазы водности водотока и крупности донных отложений [8].

Модель годового твердого стока рек разработана в Институте озераведения РАН (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612518 от 27.02.2014) [7]. Модель стохастическая, предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой годового твердого стока и основана на композиционном методе теории вероятности и аналитической формуле расхода наносов (формуле мутности воды). Композиционный метод теории вероятности позволяет оценить параметры распределения функции через параметры распределения аргументов. Аргументами модели являются расход воды и средняя глубина потока, функцией – расход наносов.

Оценка твердого стока основных притоков Ладожского озера состоит из следующих этапов:

– выбор рек-аналогов для основных притоков Ладоги (табл. 1) по схожим гидравлическим характеристикам гидрометрических створов (водность, уклон русла и крупность донных отложений) водотоков северо-запада;

– калибровка параметров расчетной формулы общего расхода наносов для рек-аналогов для различных периодов водности;

– аппроксимация функциональной зависимости поля точек $H=f(Q)$ для притоков;

– оценка параметров распределения суточных значений расхода воды притоков;

– оценка параметров распределения годового твердого стока и мутности воды основных притоков.

На рис. 2 представлен пример связи между наблюдаемыми $G_{наб}$ и рассчитанными $G_{рас}$ по формуле (1) значениями расхода наносов некоторых рек-аналогов (табл. 2), для периодов малой, средней и большой водности. Для р. Нева – г. Петрокрепость в расчетах периоды водности не выделялись по причине зарегулированности этого водотока и относительно небольшой амплитуды уровня воды. Эта зарегулированность дала основание принять данный гидрометрический створ в качестве аналога для таких зарегулированных рек как Волхов и Свирь. Среднее относительное отклонение между рассчитанными и наблюдаемыми значениями расхода наносов по всем во-

дотокам составило 62 % (минимальное значение отклонения – 34 %, максимальное – 93 %). Полученные в результате калибровки параметры трения в формулах (1) и (2) были приняты за основу дальнейших расчетов.

Для единственного притока Ладожского озера, по которому в Гидрологических ежегодниках представлены данные наблюдений за расходом наносов, была проведена валидация параметров формулы (1). Среднее относительное отклонение наблюдаемых и рассчитанных значений расхода наносов для р. Олонка – г. Олонец с принятыми параметрами реки-аналога для периода большой водности составило 59 %, что дает основание полагать выбор реки-аналога для этого водотока удачным.

Эмпирическое распределение суточных расходов воды почти для всех водотоков было аппроксимировано аналитической кривой распределения Крицкого–Менкеля. Для крайне зарегулированного каскадом ГЭС стока р. Вуоксы построена функционально-нормальная кривая распределения суточных расходов воды. Суточные расходы воды преобразованы по формуле

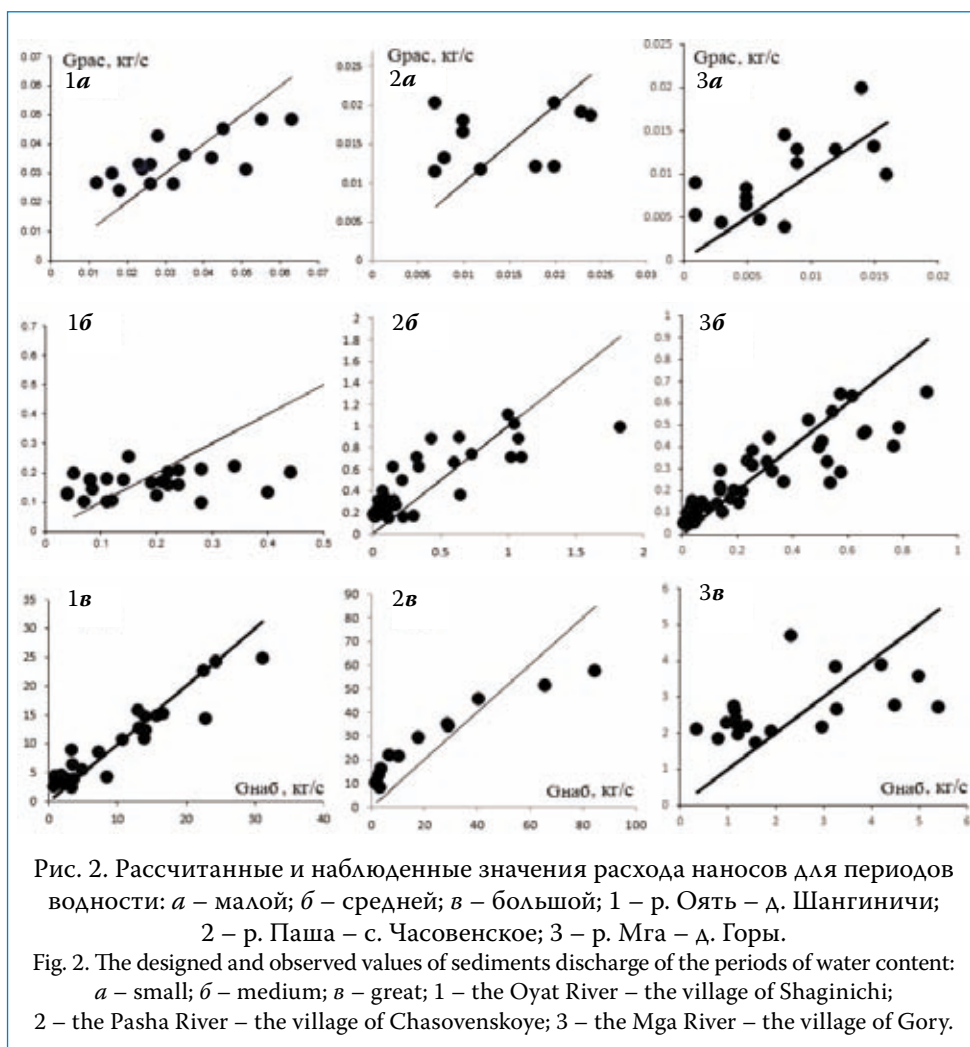
$$n = \frac{\ln(Q)}{Q} \quad (3)$$

где n – нормализованное значение расхода воды.

Всего для каждого водотока были сгенерированы ряды значений суточного расхода воды продолжительностью 100 лет, которые пересчитаны в ряды значений расхода наносов и мутности воды. В качестве количественных ориентиров при расчетах мутности воды приняты данные наблюдений за мутностью воды на исследуемых водотоках, проведенных сотрудниками Института озераведения РАН в период 2011– 2019 гг. (табл. 4) [9].

Таблица 4. Средние значения измеренной мутности воды [9]
Table 4. Average values of the measured water turbidity [9]

Река	Количество измерений	Средняя мутность воды по наблюдениям 2011– 2019 гг., мг/л
Вуокса	25	2,9
Янисйоки	26	2,3
Видлица	26	3,3
Олонка	26	9,5
Свирь	26	4,3
Сясь	26	6,6
Волхов	27	10,8



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Некоторые параметры стохастической модели годового твердого стока (среднегодовое среднесуточное расходом воды $Q_{\text{ср}}$, коэффициенты вариации и асимметрии C_v), результаты расчетов – параметры распределения мутности воды $S_{\text{ср}}$ (средние значения и средние квадратичные отклонения σ) и значение годового твердого стока $R_{\text{ср}}$ для гидрометрических створов основных притоков Ладожского озера приведены в табл. 5. Также в табл. 5 представлены данные о годовом твердом стоке $R_{\text{устье}}$ для устьевых участков притоков и годовой модуль годового стока M , т/(км²·месяц).

Согласно [10], при отсутствии данных гидрометрических наблюдений на устьевых участках водотоков, данные о твердом стоке можно получить приведением значения модуля твердого стока из вышерасположенного створа к площади водосбора устья. При этом отношение площадей водосборов гидрометрического створа и устья не должно превышать 20 %. Для шести притоков это требование выдерживается. Исключение составляет р. Видлица – с. Большие Горы, где площадь всего речного бассейна на 26 % больше площади гидрометрического створа. Но ввиду того, что данных о твердом стоке р. Видлица в нижнем течении и ее основного притока р. Новзема нет, принято допущение о восстановлении данных о твердом стоке аналогично схеме, приведенной выше. В значениях величины годового твердого стока приведены три первые цифры. Смоделированные значения средней мутности воды почти по всем водотокам (за исключением рек Волхов и Свирь) превышают средние наблюдаемые значения, что объясняется проведением отбора проб в течение года преимущественно в меженный период и период средней водности.

Согласно приведенным в табл. 5 результатам вычислений $R_{\text{устье}}$ с основными притоками (с 88 % водосборной площади Ладожского озера) в Ладогу поступает около 380 тыс. т речных наносов в год. Если привести рассчитанное значение к общей площади водосбора Ладоги, то получится, что за год в озеро попадает 432 тыс. т речных наносов. При этом сток наносов может быть несколько завышенным, т. к. в его расчет включены продукты не только склоновой, но и русловой эрозии основных притоков Ладожского озера.

Основной вклад в поступление наносов в акваторию Ладожского озера вносят водотоки с наибольшей водностью – реки Свирь, Вуокса и Волхов. Однако на эти же водотоки приходится и наименьший годовой модуль твердого стока, что объясняется удержанием наносов зонами подпора перед плотинами ГЭС на реках и, как следствие, уменьшением общего расхода наносов. Анализ годового модуля твердого стока продемонстрировал соответствие полученных значений этой величины и условий формирования твердого стока на водосборе, характеристик его почвогрунтов. Водосборы рек Сясь и Волхова относятся к Ильмень-Волховскому частному водосбору Ладоги, р. Свири – к Онежско-Свирскому, р. Вуоксы – к Саймо-Вуоксинскому, рек Видлицы и Олонки – к северо-восточной, р. Янис-Йоки – к северной части частного водосбора.

Для водосборов, расположенных в западной и северной частях (водосборы рек Янис-Йоки и Вуоксы) характерен большой процент озерности и заболоченности территории. Это, наряду с трудноразмываемыми породами Балтийского кристаллического щита, определяет и сравнительно не-

Таблица 5. Параметры распределения среднесуточного расхода воды (Q_{cp}), годового твердого стока (R_{cp}) и мутности воды (S_{cp}) для гидрометрических створов и годового твердого стока ($R_{устье}$) для устьевых участков притоков
 Table 5. Parameters of the average daily water flow (Q_{cp}), annual solid runoff (R_{cp}) and water turbidity (S_{cp}) for hydro/metric ranges and annual solid runoff ($R_{устье}$) for the mouth ranges of the tributaries

Гидрометрические створы основных притоков Ладоги	Q_{cp} , м ³ /с	C_v	C_s	C_s/C_v	R_{cp} , 10 ³ т/год	S_{cp} , г/м ³	$S_{\text{медиана}}$, г/м ³	σ_S , г/м ³	$R_{устье}$, 10 ³ т/год	M , т/(км ² ·год)
Вуокса – Х ГЭС	545	0,25	1,79	7,16	72,8	3,73 (2,9)	1,67	2,9	81,1	1,18
Янисйоки – п. Хямекоски	46,6	0,58	1,65	2,83	17,3	8,4 (2,3)	6,24	23,7	18,3	5,01
Видлица – с. Б. Горы	13,7	0,74	2,46	3,33	8,11	11,2 (3,3)	9,5	12,9	10,95	11,21
Олонка – г. Олонец	33,5	1,25	2,66	2,13	27,7	11,5 (9,5)	5,26	13,3	34,3	16,2
Свирь – XII ГЭС	538	0,35	-0,63	-1,8	77,6	4,3 (4,3)	4,1	1,07	97,6	1,16
Сясь – д. Яхново	48,8	1,57	4,53	2,89	54,3	12,0 (6,6)	4,61	16,0	63,9	10,3
Волхов – VI ГЭС	434	0,76	1,15	1,51	73,7	4,2 (10,8)	4,9	0,65	74,1	0,92

большие значения мутности и модуля твердого стока на расположенных в пределах этой территории реках.

Восточная часть водосбора Ладожского озера (бассейны рек Свирь, Олонка и Видлица) расположена на южном склоне Балтийского щита, рельеф которого характеризуется чередованием скалистых гряд и межгрядовых понижений, заполненных глинами, суглинками и супесями [6]. Легкоразмываемые почвы этой территории определяют и сравнительно высокие значения годового модуля твердого стока.

Южная часть водосбора Ладожского озера (бассейны рек Волхов и Сясь) расположена на Русской равнине. Сельскохозяйственная освоенность земель и легкоразмываемые почвы также обуславливают достаточно большие для северо-западного региона значения годового модуля твердого стока рек и для р. Сясь достигают 10 т/(км²·год).

Большие расхождения между рассчитанной и наблюдаемой мутностью объясняются неэквидистантностью данных наблюдений (большой дискретностью измерений в пределах года и, как следствие, не учетом внутригодового распределения этой величины), а также большими допущениями в подборе рек-аналогов для назначения параметров трения в расчетных формулах. Эти допущения обусловлены крайне ограниченным числом рек, на которых проводились продолжительные наблюдения за расходом наносов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, впервые рассчитан годовой сток наносов, поступающих в акваторию Ладожского озера, который составляет около 432 тыс. т/год. Расчеты выполнялись на основе авторской модели годового твердого стока рек, разработанной в Институте озероведения РАН.

Модель основана на композиционном методе теории вероятности и аналитической формуле расхода наносов. По результатам моделирования показано, что основными источниками поступления наносов в озеро являются три крупных притока Ладоги – реки Свирь, Волхов и Вуокса, на долю которых приходится 253 тыс. т/год или 59 % от общего количества наносов, поступивших в озеро. При этом средний по водосбору Ладожского озера годовой модуль твердого стока равен 1,53 т/(км²·год), что хорошо соотносится с оценкой этой величины для рассматриваемой территории, приведенной в монографии [11].

Проведенный анализ создает необходимые предпосылки для решения задач, связанных с количественной оценкой интенсивности заиления судходных фарватеров южной мелководной части Ладожского озера, а также переноса взвешенных частиц в акватории при различных циркуляциях водной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Распопов И.М.* Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1985. 188 с.
2. *Россолимо Л.П.* Проблема антропогенного эвтрофирования озер и пути ее решения. – Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1971. Т. 1. С. 35–45.
3. *Лепихин А.П., Головачева С.И.* К проблеме регламентации отведения взвешенных веществ в естественные водотоки // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 4–13.
4. Ладога / Ред. В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев. СПб: Нестор-история, 2013. 468 с.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Карелия и Северо-Запад, Т. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 528 с.
6. *Алябина Г.А., Сорокин И.Н.* Бассейн Ладожского озера как источник воздействия на экологическое состояние озера // Региональная экология. 2010. № 4 (30). С. 27–35.

7. Шмакова М.В. Расчеты твердого стока рек и заиления водохранилищ. СПб: Издательство ВВМ, 2018. 149 с.
8. Шмакова М.В. К вопросу о расчетах расхода взвешенных наносов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 1. С. 50–71.
9. Разработка и совершенствование научных, технических, методических и правовых основ с целью сохранения Ладожского озера как геостратегического объекта питьевого водоснабжения федерального значения на основе комплексных исследований: Отчет о НИР по теме Плана НИР ИНОЗ РАН на 2013–2019 гг. № 0154-2014-0003 (закл.) / ИНОЗ РАН; рук. В.А. Румянцев, Ш.Р. Поздняков. СПб, 2018. Ч. 1. № ГР 01201363379. 199 с.
10. Мозжерин В.И., Мозжерин В.В. Мировой сток взвешенных наносов: его геоморфологическая и геоэкологическая интерпретация // Геоморфология. 2011. № 1. С. 13–24.
11. Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 240 с.

Для цитирования: Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Сток наносов и мутность воды основных притоков Ладожского озера // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 3. С. 71–84. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-3-4.

Сведения об авторах:

Шмакова Марина Валентиновна, д-р геогр. наук, старший научный сотрудник, Институт озероведения Российской академии наук, ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН), Россия, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Кондратьев Сергей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, заместитель директора по научной работе ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН, Россия, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9; e-mail: kondratyev@limno.org.ru

SEDIMENT RUNOFF AND WATER TURBIDITY OF THE MAIN TRIBUTARIES OF THE LAKE LADOGA

Marina V. Shmakova¹, Sergey A. Kondratyev²

E-mail: m-shmakova@yandex.ru

Abstract: The vast catchment area of the Lake Ladoga is characterized by variety of underlying surface types and a complex hydrographic network. The processes of eutrophication of the southern littoral areas of the Lake Ladoga determine the relevance of assessing the removal of solid matter from the river flow to the estuaries of the tributaries of the Ladoga. Observations of sediment runoff of the main tributaries the Lake Ladoga were not carried out. In this regard, for each tributary were selected rivers-analogues the main criteria in the selection was the slope, the grain size of sediments and the catchment area (water availability). The modeling of annual solid runoff and turbidity of the Ladoga tributaries is based on an analytical formula for sediment flow by M.V. Shmakova and a stochastic model

of annual solid runoff (M.V. Shmakova). According to the calculations, the annual flow of sediment entering the Ladoga water area is about 432 thousand t/year. The main sources of sediment are three major tributaries of the Lake Ladoga – the Svir, Volkhov and Vuoksa rivers, which account for 253 thousand t/year or 59 % of the total amount of sediment received in the lake. However, these watercourses have the smallest annual module solid flow, due to retention of sediment of backwater areas before hydroelectric dams on these rivers and as a consequence, a decrease in the overall sediment discharge. At the same time, the average annual solid runoff modulus for the Ladoga lake catchment area is 1.53 t/(km²·year), which corresponds well to the previous estimate of this value for the territory under consideration. The analysis of the annual module of solid runoff showed a good correspondence between the obtained values of this value and the conditions for the formation of solid runoff in the catchment, the characteristics of its soils.

Keywords: sediment discharge, rivers, Ladoga Lake, catchment, modeling, water turbidity, the module of annual solid discharge.

Financing: This work was financially supported by the federal budget in the framework of the state task No. 0154-2019-0001 of the state assignment of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences “Comprehensive assessment of the dynamics of ecosystems of Lake Ladoga and its basin under the influence of natural and anthropogenic factors.” Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences (IL RAS).

About the authors:

Marina V. Shmakova, Doctor of Geographical Sciences, Senior Researcher, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, “St. Petersburg Research Center of the Russian Academy of Sciences”, ul. Sevostyanova, 9, St. Petersburg, 196105, Russia; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Sergey A. Kondratyev, Doctor of Physical/mathematical Sciences, Deputy Director for Science Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, “St. Petersburg Research Center of the Russian Academy of Sciences”, ul. Sevostyanova, 9, St. Petersburg, 196105, Russia; e-mail: kondratyev@limno.org.ru

For citation: *Shmakova M.V., Kondratyev S.A. Sediment Runoff and Water Turbidity of the Main Tributaries of the Lake Ladoga // Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2021. No. 3. P. 71-84. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-3-4.*

REFERENCES

1. *Raspopov I. M.* Vysshaya vodnaya rastitel'nost' bol'shih ozer Severo-Zapada SSSR. [The supreme aquatic vegetation of the great lakes of the North-West of the USSR]. L.: Nauka, Leningrad Department. 1985: 188 p. [In Russian].
2. *Rossolimo L.P.* Problema antropogenno ego evtrofirovaniya ozer i puti eyo resheniya [The problem of anthropogenic lake eutrophication and ways to solve it]. Izv. AN SSSR. Ser. geogr. Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Geographical series. 1971, Vol. 1: 35-45. [In Russian].
3. *Lepihin A.P., Golovacheva S.I.* K problem reglamentatsiy otvedeniya vzheshennykh veshchestv v yestestvenniye vodotoki [On the problem of regulating the discharge of suspended substances into natural watercourses]. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2015, 1: 4 – 13. [In Russian].
4. Ladoga. [Ladoga]. Red. V.A. Rumyantseva, S.A. Kondrat'eva. SPb: Nestor-istoriya, 2013: 468 p. [In Russian].

5. Resursy poverhnostnykh vod SSSR. Kareliya i Severo-Zapad. Poverkhnostniye vodniye resursy SSSR. Kareliya i Severo-Zapad. [Surface water resources of the USSR. Karelia and the North-West.] Vol. 2, Part 1. L.: Gidrometeoizdat, 1972: 528 p. [In Russian].
6. *Alyabina G.A., Sorokin I.N.* [The Lake Ladoga basin as a source of influence on the ecological state of the lake]. *Regional'naya ekologiya*. 2010. 4 (30): 27-35. [In Russian].
7. *Shmakova M.V.* Raschety tverdogo stoka rek i zaileniya vodohranilishch. [Calculations of solid river flow and siltation of reservoirs]. SPb: Publishing house VVM, 2018: 149 p. [In Russian].
8. *Shmakova M.V.* On the issue of calculating the consumption of suspended sediments. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020. 1: 50-71. [In Russian].
9. Razrabotka i sovershenstvovanie nauchnykh, tekhnicheskikh, metodicheskikh i pravovykh osnov s cel'yu sohraneniya Ladozhskogo ozera kak geostrategicheskogo ob'ekta pit'evogo vodosnabzheniya federal'nogo znacheniya na osnove kompleksnykh issledovaniy. [Development and improvement of scientific, technical, methodological and legal bases for preserving the Lake Ladoga as a geostrategic object of drinking water supply of Federal significance on the basis of comprehensive research]. Research report on the topic of the research Plan of Institute of Limnology RAS for 2013-2019, № 0154-2014-0003 (finished). Red. V.A. Rumyancev, SH.R. Pozdnyakov. SPb, 2018. Part 1: 199 p. SR 01201363379. [In Russian].
10. *Mozzherin V.I., Mozzherin V.V.* Mirovoy stok vzveshennykh nanosov: yego geo/morfologicheskaya i geokologicheskaya interpretatsiya [Global suspended sediment runoff: its geomorphological and geo/ecological interpretation]. *Geomorfologiya*. 2011. 1: 13-24. [In Russian].
11. Stok nanosov, ego izuchenie i geograficheskoe raspredelenie. [Sediment runoff, its study and geographical distribution]. Ped. A. V. Karaushev. L.: Gidrometeoizdat, 1977: 240 p. [In Russian].