УДК 630.116.25:556.13 doi 10.33933/2074-2762-2020-59-51-66

Влияние вырубок леса на сток и вынос биогенных элементов с лесных водосборов Карелии (по данным математического моделирования)

С.А. Кондратьев[1], Ю.В. Карпечко[2], М.В. Шмакова[1]

[1] ФГБУН Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, kondratyev@limno.org.ru
[2] Институт леса — обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

Предложена модель стока и выноса биогенных элементов с лесного водосбора, описывающая динамику изучаемых процессов при естественном развитии древостоя и в процессе лесовосстановления после вырубки. Показано, что при выполнении лесохозяйственных мероприятий в соответствии с лесохозяйственным регламентом существенных изменений стока и выноса биогенных элементов не фиксируется. Полученный результат объясняется тем, что объем вырубаемой древесины примерно равен объему прироста и степень варьирования стока и выноса химических веществ в замыкающем створе мало зависит от лесопромышленной деятельности человека. Проведено имитационное моделирование последствий гипотетических вырубок 50 и 100 % площади леса на экспериментальном водосборе, которое позволило оценить интервал возможных экстремальных изменений стока и выноса биогенных элементов.

Ключевые слова: математическая модель, испарение, сток, вынос биогенных элементов, вырубка леса.

Influence of forest cutting down on runoff and nutrient removal from forest catchment of Karelia (according to mathematical modeling)

S.A. Kondratyev[1], Yu.V. Karpechko[2], M.V. Shmakova[1]

[1] Institute of Limnology of RAS, Saint Petersburg, Russia
[2] Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk, Russia

The purpose of this study is to assess the impact of forestry activities on the runoff and nutrient removal from the forest catchments of Karelia using mathematical modeling. The catchment area of the Big Velmuksa river in Karelia with an area of about 139 km^2 has been chosen as a research object. It is a part of the catchment of the Vodla river - one of the largest tributaries of Lake Onega. Almost the entire catchment area of the Big Velmuksa river is forested (94%). The main direction of economic activity in the forest catchment areas in Karelia, including the Big Velmuksa catchment, is cutting down and growing new forest. In this study a simple model of runoff and nutrient removal from the forest catchment has been proposed. The purpose of this model is to describe the dynamics of the studied processes both during the natural development of the forest and in the process of reforestation after cutting down. It is shown that when forestry activities are carried out in accordance with forestry regulations rules, significant changes in runoff and nutrient removal are not recorded. The obtained result is explained by the fact that the volume of cutting down is approximately equal to the volume of growth, the level of variation in runoff and removal of chemicals depending insignificantly on human forestry activities. In addition, a simulation of the effects of hypothetical cutting down of 50 and 100% of the forest area on an experimental catchment has been carried out, allowing to assess the interval of possible extreme changes in runoff

and nutrient removal. The results show the increase in runoff from the catchment to be 48 mm / year and the decrease in nutrient removal - 14.3 tN / year and 0.35 tP / year after 100% deforestation. Subsequent reforestation and the associated increase in nitrogen and phosphorus removal will continue for about 80 years.

Keywords: mathematical model, evaporation, runoff, nutrient removal, forest cutting down.

For citation: *S.A. Kondratyev, Yu.V. Karpechko, M.V. Shmakova.* Influence of forest cutting down on runoff and nutrient removal from forest catchment of Karelia (according to mathematical modeling). *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 51—66. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-51-66

Введение

Около 50 % территории Европейского Севера России занято лесами. Леса представляют собой сложные природные объекты, различающиеся по многим характеристикам: породному составу, условиям произрастания древостоя, его продуктивности, возрасту и др. Роль леса в гидрофизических и гидрологических процессах еще слабо исследована, так как он относится к природным объектам, в которых очень трудно проводить экспериментальные воднобалансовые исследования. Значительную сложность представляет организация измерения испарения с леса существующими методами натурных исследований. Вместе с тем испарение относится к тем элементам водного баланса водосборов, которые в наибольшей степени зависят от антропогенного воздействия, определяющего преобразование количественных и качественных характеристик водных ресурсов территорий.

При отсутствии наблюдений часто приходится прибегать к методам математического моделирования. Динамика испарения с леса на различных этапах его развития является исходной информацией для моделирования гидрологического режима лесных водосборов, стока с них и выноса химических веществ, а также для оценки влияния антропогенной деятельности на сток малых рек и определения экологического ущерба, уже причиненного лесохозяйственной деятельностью [1—5].

Целью настоящего исследования является оценка воздействия лесохозяйственных мероприятий на сток и вынос биогенных веществ с лесных водосборов Карелии с использованием методов математического моделирования.

Объект исследования

В качестве объекта исследования выбран водосбор реки Бол. Велмуксы площадью 139 км^2, расположенный в Пудожском районе Республики Карелия и входящий в водосбор одного из крупнейших притоков Онежского озера — р. Водлы (рис. 1).

Практически весь водосбор р. Бол. Велмуксы покрыт лесом (94 %). Хвойные породы занимают 65 % покрытой лесом части водосбора, 13 % этой территории занято сосновыми лесами, 52 % — еловыми. На остальной покрытой лесом части водосбора произрастают мягколиственные породы, среди которых основное место

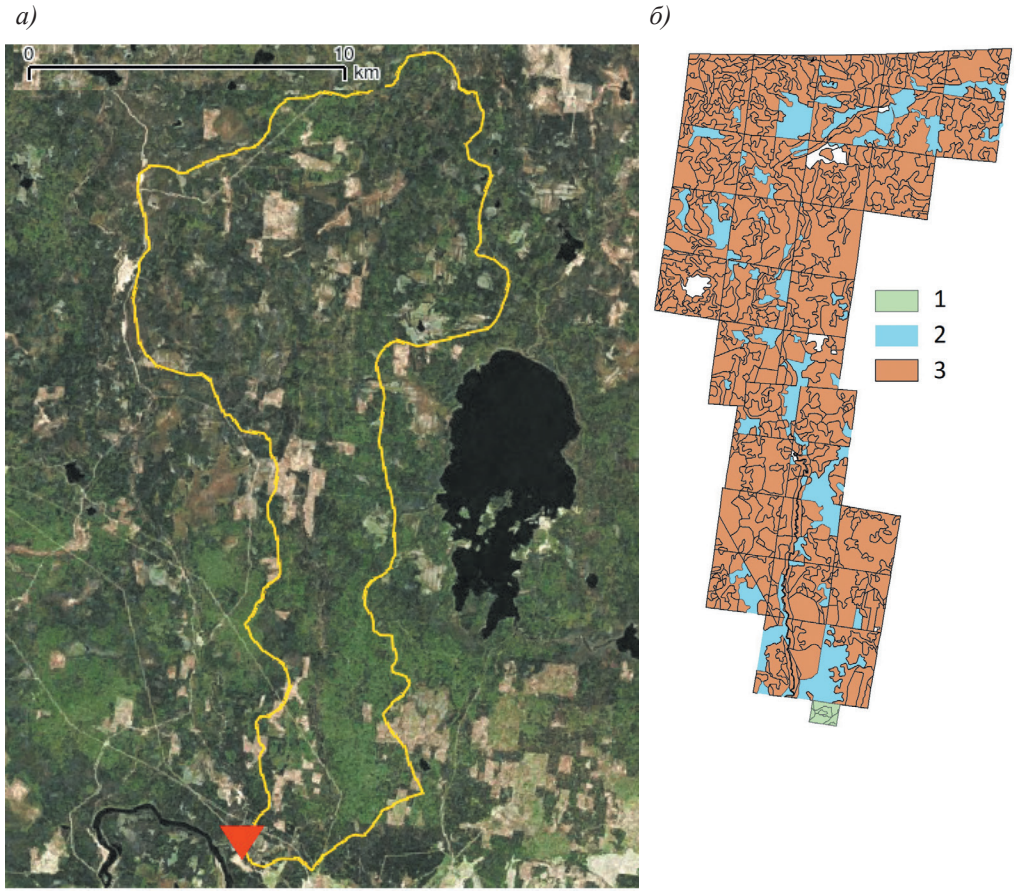

Рис. 1. Схема водосбора р. Бол. Велмуксы (*а*) и расположенная на нем ква́ртальная сеть (*б*).

1 — зеленые зоны, *2* — леса водоохранных зон, *3* — эксплутационные леса.

Fig. 1. Scheme of Big Velmuksa catchment (*а*) and its quarter network (*б*).

1 – green zones, *2* – forests of water protection zones, *3* – operational forests.

занимают березняки (34 %) и около 1 % приходится на осиновые леса. Средний возраст сосняков и ельников составляет 85 — 90 лет, а березняков — 50 лет. Озера занимают на водосборе менее 1% всей его площади, а заболоченность составляет чуть больше 3 %.

Основным направлением хозяйственной деятельности на лесных водосборах Карелии, и в том числе на водосборе р. Бол. Велмуксы, являются заготовка древесины и уход за растущим лесом. Спелые и перестойные леса рубят, как правило, с целью заготовки древесного сырья. Выполняемые в таких лесах рубки подразделяются на выборочные и сплошные. После сплошных рубок на лесном участке

(вырубке) начинаются динамичные процессы, аналогичные происходящим после предыдущего удаления древостоя на той же самой лесосеке. На основе материалов лесохозяйственного регламента Пудожского центрального лесничества [6], на территории которого расположен водосбор р. Бол. Велмуксы, рекомендуемая к принятию площадь расчетной лесосеки составляет 0,9 % общей площади лесных угодий, т. е. около 125 га. Соотношение площади лиственных пород и площади хвойных составляет 3/7.

Методика исследования

В качестве основного инструмента для моделирования стока с водосбора использована гидрологическая модель формирования стока с водосбора *IL_HM – Institute of Limnology Hydrological Model* (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015 г.), разработанная в Институте озероведения РАН [8, 9] и предназначенная для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоеме. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель может работать как с месячным шагом по времени, так и с годовым. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Значения основных параметров гидрологической модели, определяющих форму гидрографа стока, могут задаваться в зависимости от озерности, т. е. доли площади водоемов в общей площади водосбора. Схема модели представлена на рис. 2.

Модель прошла верификацию на ряде объектов, расположенных в Северо-Западном регионе России (водосборы рек Тигода, Лижма, Сяньга, Олонка, Сунна, Шуя, Оять, Сясь, Вуокса, Свирь, Великая, Нева) [7—9] и Финляндии (водосборы рек Мустайоки и Харайоки) [10]. В настоящее время *IL_HM* успешно применяется как средство оценки воздействия климатических изменений на сток рек Северо-Запада РФ, а также в качестве основы для расчетов выноса биогенных веществ с водосборов.

Для решения задачи, связанной с количественной оценкой воздействия вырубок на сток, модель нуждается в существенной модификации блока, описывающего суммарное испарение с лесного водосбора, так как возможны изменения стока. Повышенное внимание к блоку испарения обусловлено, прежде всего, тем, что при вырубках леса изменения стока происходят именно за счет уменьшения суммарного испарения с поверхности водосбора.

Институтом озероведения РАН совместно с Институтом леса Карельского научного центра РАН разработана модель для расчета испарения с лесных массивов *EVAP_FOR* (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662377) [3, 11—13]. Отличительной чертой настоящей модели является то, что в ней рассчитывается суммарное испарение не только в зависимости от

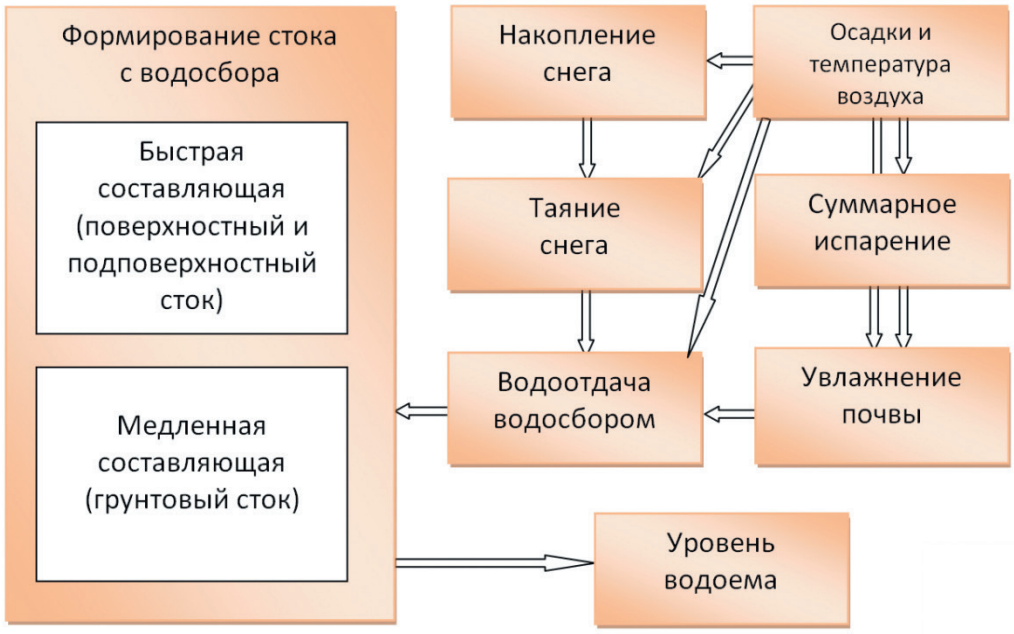

Рис. 2. Схема модели *IL_HM*.

Fig. 2. Scheme of the *IL_HM* model.

осадков, температуры воздуха и дефицита влажности воздуха, как это делается в абсолютном большинстве известных моделей испарения, но и от возраста леса и его таксационных характеристик. Слои испарения с лесных массивов оцениваются как сумма транспирации древостоем, испарения с напочвенного покрова и задержанных пологом леса осадков. Учитывается разнообразие таксационных характеристик древостоя и возрастные изменения растительного покрова. В качестве интегрального показателя характеристик, влияющих на формирование испарения и физических аспектов транспирации, принимаются масса листвы и индекс листовой поверхности. Транспирация древостоем определяется как произведение массы листвы на удельную величину транспирации, рассчитанной для единицы площади на основе экспериментальных данных [13]. Испарение с напочвенного покрова рассчитывается как функция возможного в конкретных условиях испарения с безлесного участка и индекса листовой поверхности древостоя. Испарение задержанных пологом леса осадков определяется как функция массы листвы и метеорологических характеристик.

Расчетные зависимости, составляющие основу модели, представляют собой аппроксимацию кривых, описывающих динамику суммарного испарения с различных типов леса с учетом его развития с шагом по времени, равным одному месяцу, и полученных в результате обобщения многолетних экспериментальных данных, собранных в Институте леса КарНЦ РАН [13]. Поскольку экспериментальный

материал, положенный в основу расчетных зависимостей, собирался именно в условиях лесов Карелии, не возникает проблем с дополнительной калибровкой и верификацией модели на водосборе р. Бол. Велмуксы. В данной задаче модель *EVAP_FOR* обеспечивает месячными значениями слоев испарения модель формирования. Схема модели представлена на рис. 3.

На рис. 4 представлено сравнение измеренных и рассчитанных по моделям *IL_HM* и *EVAP_FOR* гидрографов слоев стока с водосбора р. Бол. Велмуксы за период 2010—2015 гг. Расчеты выполнялись для створа наблюдательной сети Росгидромета в городе Пудож. Приведенное на рис. 4 значение критерия Нэша-Сатклифа NS, равное 60 %, подтверждает удовлетворительное соответствие результатов натурных измерений и моделирования. Можно предположить, что завышение рассчитанных расходов воды в период межени связано с тем, что русло р. Бол.

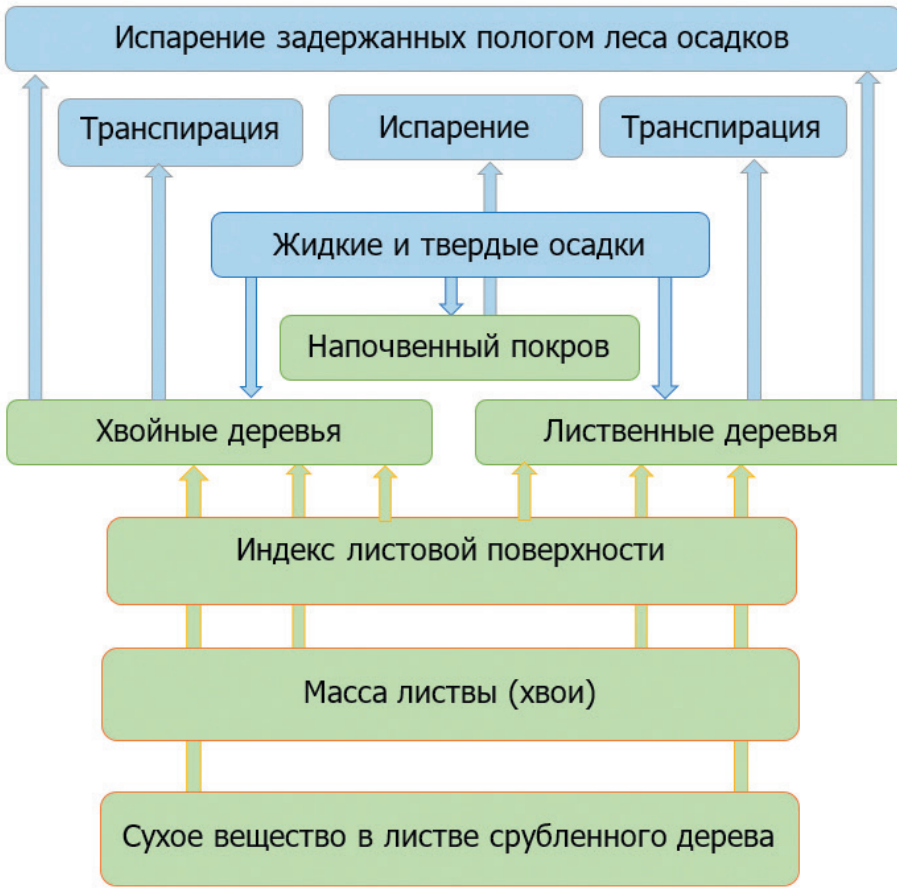

Рис. 3. Схема модели формирования испарения с леса *EVAP_FOR*.

Fig. 3. Scheme of the forest evaporation model *EVAP_FOR*.

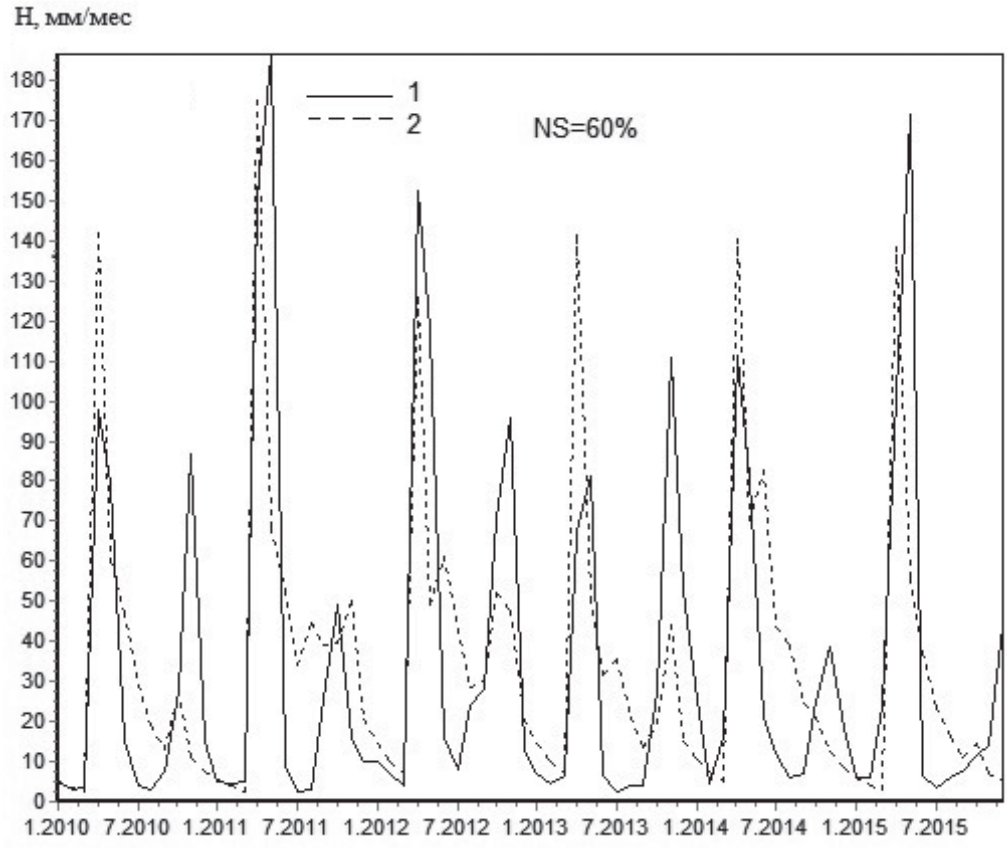

Рис. 4. Измеренные (*1*) и рассчитанные (*2*) гидрографы стока с водосбора р. Бол. Велмуксы за период 2010—2015 гг.

Fig. 4. Measured (*1*) and calculated (*2*) runoff hydrographs from the Big Velmuksa river catchment in years 2010—2015.

Велмуксы дренирует не весь сток с водосбора. Часть грунтового стока может попадать напрямую в русло р. Водлы, однако это предположение требует проведения дополнительного экспериментального исследования.

Для расчета выноса биогенных элементов с лесного водосбора, сформировавшегося в результате разложения опада растительного покрова, имеется следующая зависимость [14]:

$$W = \sum_{i=1}^{n} \alpha U_i F_i, \qquad (1)$$

где W — объем выноса в пределах изучаемого водосбора (кг/год); n —число рассматриваемых растительных сообществ; α — коэффициент, характеризующий возможный вынос со стоком рассматриваемого биогенного элемента при разложении

растительного опада; U_i — удельное количество биогенного элемента, ежегодно поступающего на водосбор с растительным опадом *i*-го растительного сообщества (кг/(га·год)); F_i — площадь *i*-го растительного сообщества в пределах изучаемого водосбора (га).

Согласно рекомендациям работы [14], для условий Северо-Запада России значения α могут быть приняты равными 0,035 для азота и 0,008 для фосфора. Значения U_i для различных типов растительности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Удельное содержание биогенных веществ в растительном опаде [14]

Specific nutrient content in plant litterfall [14]

Тип растительного сообщества	Удельное содержание, кг/га	
	$N_{общ}$	$P_{общ}$
Лес хвойный		
Ель	36,0	2,0
Сосна	16,0	4,3
Лес лиственный		
Береза	60,0	8,8
Липа	38,0	9,0
Осина	46,0	4,0
Ольха	40,0	3,0
Сады, парки	25,0	2,5
Болото		
Верховое	52,0	10,0
Низинное	95,0	12,0
Прочие сельскохозяйственно-неосвоенные земли		
Луга естественные	46,0	5,0
Территории с изреженным травяным покровом	15,0	1,5

Использование опада в качестве основного аргумента выноса биогенных элементов обусловлено его доминирующей ролью в поступлении этих элементов на водосбор. Вынос азота и фосфора с водосбора с дождевым и талым стоком в значительной степени определяет уровень биогенной нагрузки на водоем-водоприемник, а следовательно, и его трофическое состояние. В среднем поступление азота и фосфора с опадом составляет 80—90 % всей приходной части биогенного баланса спелых и перестойных ельников и сосняков на водосборе [3]. Существенная роль опада в возврате химических элементов в лесные почвы подчеркивается во многих работах [15—17]. При резком сокращении опада в результате вырубок происходят, в частности, значительное снижение содержания азота в верхних горизонтах лесной подстилки и его перенос в минеральные слои почвы [18]. Соответственно снижается и вынос биогенных веществ с водосбора.

При решении задачи оценки изменений биогенного стока с лесного водосбора после вырубок можно предположить, что для *i*-го участка леса количество биогенного элемента, поступающего в лесную подстилку с растительным опадом w_i (кг/год), складывается из двух составляющих: $w_i = U^* + U_i$, где U^* — удельное

количество биогенного элемента в опаде для «территории с изреженным травяным покровом» (см. табл. 1), и U_i — удельное количество биогенного элемента в опаде для i-го участка леса (см. табл. 1). После проведения вырубки значение U_i становится нулевым, а затем с течением времени увеличивается и через определенное число лет достигает прежних значений. В этом случае в расчетной схеме появляется еще один параметр $T_{i\,\max}$ (число лет) — время достижения возраста рубок i-го участка. Для условий Карелии могут быть приняты следующие значения $T_{i\,\max}$: 80 лет для ели и сосны, 60 лет для березы и 40 лет для осины. Если предположить, что возрастание U_i имеет линейной характер [3], то расчетная схема для оценки выноса со стоком рассматриваемого биогенного элемента за счет разложения растительного опада приобретает следующий вид:

$$W = \sum_{1}^{n} \alpha w_i,$$

$$w_i = \begin{cases} U^* F_i & \text{при } T_i = 0, \\ \left(a_i T_i + U^*\right) F_i & \text{при } T_i \le T_{i\max}, \\ \left(a_i T_{i\max} + U^*\right) F_i & \text{при } T_i > T_{i\max}, \end{cases} \qquad (2)$$

где w_i — количество биогенного элемента в разлагающемся опаде для i-го типа лесного сообщества, доступное для выноса со стоком в течение расчетного года (кг/год); n — число лесных сообществ; T_i — возраст i-го растительного сообщества (число лет); a_i — ежегодное увеличение содержания биогенных элементов в опаде для каждого i-го растительного сообщества (кг/(га·год)); U^* — количество биогенного элемента в опаде на территориях с изреженным травяным покровом (кг/га); F_i — площадь i-го растительного сообщества в пределах изучаемого водосбора (га); $T_{i\,\max}$ — время достижения возраста рубок (число лет); α — коэффициент, характеризующий возможный вынос биогенного элемента при разложении растительного опада. Значения коэффициента a_i, рассчитанные с учетом приведенных выше значений $T_{i\,\max}$, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения параметра a_i в формуле (2)

The values of the parameter a_i in equation (2)

Тип растительного сообщества	a_i, кг/(га·год)	
	$N_{общ}$	$P_{общ}$
Лес хвойный		
Ель	0,45	0,025
Сосна	0,2	0,05375
Лес лиственный		
Береза	1	0,1467
Осина	1,15	0,1

Формула (2), а также значения параметров, приведенные в табл. 2, являются авторской разработкой в рамках настоящего исследования.

Представленный выше математический аппарат представляет собой основу для выполнения серии имитационных расчетов по выявлению и количественной оценке изменений стока и выноса азота и фосфора с лесного водосбора в результате вырубки и последующего восстановления леса.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования выполнялись расчеты испарения и стока с водосбора р. Бол. Велмуксы при средних многолетних значениях метеорологических параметров (количества осадков и температуры воздуха) и характеристиках лесного покрова, соответствующих уровню 2018 г. После этого проводилась имитация проведения сплошной вырубки на расчетной лесосеке площадью 125 га, составляющей 0,9 % общей площади покрытой лесом части водосбора. При этом соотношение пород деревьев сохранялось.

Результат оказался вполне ожидаемым. Изменение испарения на 0,9 % площади водосбора визуального эффекта по изменению гидрографа стока не дали. Уменьшение суммарного испарения с водосбора составило 0,03 % начального значения, соответственно сток увеличился на 0,05 %. Уменьшение лиственного опада после вырубки на указанной площади также привело в незначительному сокращению выноса азота и фосфора — не более чем на 0,5 % по отношению к уровню 2018 г.

Полученный результат объясняется тем, что в ходе эксплуатации лесного фонда в соответствии с существующими рекомендациями ведения лесохозяйственной деятельности на достаточно крупном (относительно площади ежегодных рубок) водосборе объем вырубаемого древостоя и площадь создаваемых при этом новых вырубок на водосборе компенсируются за счет процесса лесовосстановления. При этом для расчетной лесосеки объем вырубаемой древесины примерно равен объему прироста, и степень варьирования стока и выноса химических веществ в замыкающем створе мало зависит от лесопромышленной деятельности человека.

Для оценки чувствительности внутригодового распределения стока с лесного водосбора к гипотетическим вырубкам леса на гораздо больших площадях проведены расчеты, имитирующие последствия вырубки 50 и 100 % леса на водосборе р. Большой Велмуксы. Такие высокие значения приняты не только для улучшения визуализации результатов моделирования, но и для оценки границ максимальных возможных изменений стока и выноса биогенных веществ в результате вырубок на исследуемом водосборе. Результаты расчетов, выполненных с использованием средних многолетних значений метеорологических параметров, представлены на рис. 5.

Расчеты показали, что изменение суммарного испарения после вырубки наиболее выражено в летне-осенний период. В среднем за год испарение снижается на 20 мм/год при 50 %-ной вырубке и на 48 мм/год при 100 %-ной вырубке.

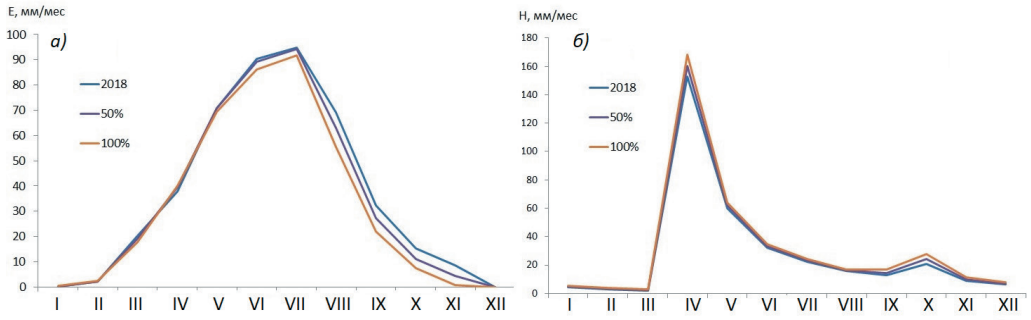

Рис. 5. Внутригодовая динамика суммарного испарения (*а*) и стока (*б*)
с водосбора р. Бол. Велмуксы по состоянию на 2018 г.,
а также после вырубки 50 и 100 % общей площади леса.

Fig. 5. Monthly dynamics of total evaporation (*а*) and runoff (*б*)
from the Big Velmuksa catchment in year 2018,
as well as after cutting down 50 % and 100 % of the total forest area.

Соответственно на эти же значения увеличивается и годовой сток. Наиболее значимое возрастание стока отмечается в периоды весеннего половодья (на 9 % по отношению к средним климатическим значениям) и осенних дождевых паводков (на 25 %).

Для оценки возможных изменений годового стока и выноса биогенных элементов в результате вырубки леса и последующего лесовосстановления выполнена серия имитационных расчетов, иллюстрирующая динамику изменения слоя стока и массы вынесенных общего азота и общего фосфора за период времени от момента вырубки до полного лесовосстановления на водосборе р. Бол. Велмуксы. Значения выноса биогенных элементов, рассчитанные с использованием уравнения (2) для условий 2018 г., составили 22,3 тN/год (160,4 кгN/(км^2·год)) и 0,52 тР/год (3,7 кгР/(км^2·год)). Можно заметить, что полученный результат соответствует известному районированию выноса азота и фосфора на российской части водосбора Финского залива в области Балтийского кристаллического щита, представленному, например, в работе [9]. Приведенные значения выноса в условиях 2018 г. послужили начальным условием для выполнения последующих имитационных расчетов по оценке последствий вырубки.

Так же как и в случае расчетов стока, расчеты изменения листового опада на лесосеке, площадь которой составляла 0,9 % площади водосбора, визуального эффекта при моделировании выноса с водосбора биогенных элементов не дали. Результаты расчетов последствий гипотетической вырубки 50 % площади леса более ощутимы (рис. 6).

На основе представленных материалов можно сделать вывод о том, что модель описывает динамику процессов испарения и стока в период лесовосстановления адекватно существующим представлениям, основанным на результатах

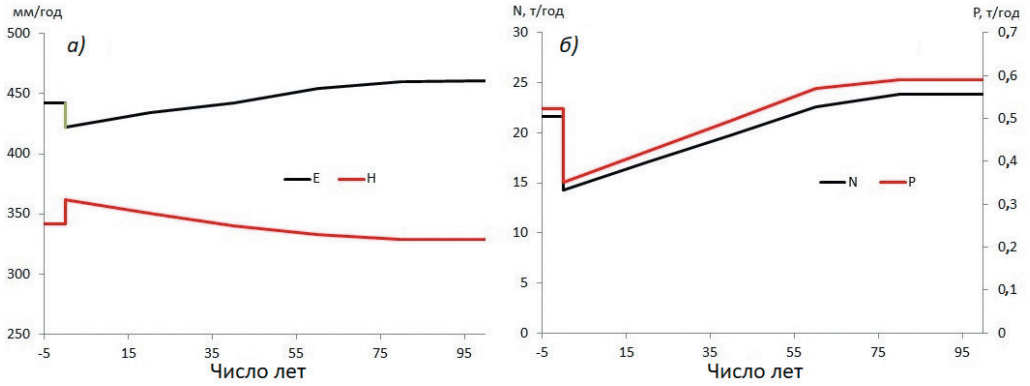

Рис. 6. Динамика среднегодовых значений испарения и стока (*а*), а также выноса азота и фосфора (*б*) в процессе лесовосстановления после вырубки 50 % площади леса на водосборе р. Бол. Велмуксы.

Fig. 6. The dynamics of the mean annual values of evaporation and runoff (*a*) and the removal of nitrogen and phosphorus (*б*) in the process of reforestation after cutting 50 % of the forest area in Big Velmuksa catchment.

многолетних натурных наблюдений. При этом продолжительность лесовосстановления для рассматриваемого объекта составляет около 80 лет.

В соответствии с результатами моделирования гипотетическая вырубка 50 % леса на водосборе р. Бол. Велмуксы может привести к резкому снижению листового опада и, соответственно, к снижению выноса биогенных элементов, образующихся в результате его разложения. Для условий проведенной имитации первоначальный вынос снизится для азота на 7,3 т/год (34 % от уровня 2018 г.) и для фосфора на 0,17 т/год (33 % от уровня 2018 г.). Далее, по мере лесовосстановления, через 55 лет значения выноса азота и фосфора восстановятся до уровня 2018 г. Затем последует небольшое увеличение как стока, так и выноса биогенных элементов, связанное с продолжением лесовосстановления хвойных пород вплоть до 80-го года после вырубки. Максимального возможного снижения показателей выноса можно ожидать в первые годы после 100 %-ной вырубки — 14,3 тN/год и 0,35 тP/год.

Полученные оценки изменений стока и выноса биогенных элементов с лесного водосбора в результате вырубки являются весьма приближенными, так как не учитывают ряд важных процессов, влияющих как на сток, так и на вынос азота и фосфора. Не учитываются изменения таксационных характеристик леса в процессе лесовосстановления, а также резкое возрастание эрозии и связанного с ней выноса химических веществ в первый год послы вырубки за счет нарушения структуры поверхностного слоя почв. После вырубки возрастает вероятность возникновения «запирающего слоя», возникающего при промерзании поверхностного слоя почвы и переводящего талый сток в поверхностную составляющую. Отсутствие запирающего слоя в лесу приводит к снижению максимальных расходов

в период снеготаяния и увеличению меженного стока. Учет этих и других факторов, влияющих на сток и вынос биогенных элементов с водосбора, требует проведения серьезных натурных исследований, для которых необходимы соответствующие материальные затраты, а также высокая квалификация специалистов. Тем не менее представленные в настоящей статье результаты позволяют сделать предварительную оценку максимальных возможных изменений стока и выноса биогенных элементов с лесных водосборов как при реальных, так и при гипотетических масштабах вырубки леса. Принципиальных изменений результатов моделирования едва ли стоит ожидать даже при учете в расчетах перечисленных выше особенностей и закономерностей изучаемых процессов.

Сейчас трудно представить, что на таких достаточно крупных водосборных площадях будут проводиться сплошные рубки. Тем не менее, по данным работы [19], в настоящее время лесами в бассейне Онежского озера покрыто уже всего 54 % площади водосбора. Представленные в настоящей работе оценки позволяют количественно судить о возможных экстремальных изменениях стока и выноса азота и фосфора в экстремальных условиях ведения лесного хозяйства. Если же будет стоять задача оценить последствия сплошной вырубки на единичной лесосеке, то результаты гипотетических расчетов 100 %-ной вырубки приобретут вполне реальное практическое воплощение.

Заключение

• Предложенная относительно простая модель формирования стока и выноса биогенных элементов с лесного водосбора позволяет описывать изучаемые процессы в динамике и с достаточной степенью адекватности существующим экспериментальным данным.

• Имитационное моделирование проведения сплошной вырубки на расчетной лесосеке выбранного экспериментального водосбора р. Бол. Велмуксы, площадь которой составляет 0,9 % общей площади, не дали визуального эффекта как по изменению гидрографа стока, так и сокращению выноса азота и фосфора с водосбора. Изменения расчетных величин не превосходят доли процента от первоначальных значений. Полученный результат объясняется тем, что объем вырубаемой древесины примерно равен объему прироста и степень варьирования стока и выноса химических веществ в замыкающем створе мало зависит от лесопромышленной деятельности человека, если она выполняется в соответствии с действующими правилами.

• Имитационное моделирование последствий гипотетической вырубки 50 и 100 % площади леса на экспериментальном водосборе позволило оценить интервал возможных экстремальных изменений стока и выноса биогенных элементов. Так, после 100 %-ной вырубки леса можно ожидать увеличение стока с водосбора на 48 мм/год и снижение выноса на 14,3 тN/год и 0,35 тР/год. Продолжительность последующего лесовосстановления и связанного с ним возрастания выноса азота и фосфора, обусловленного увеличением листового опада, составит около 80 лет.

• Следует отметить, что одним из наиболее перспективных направлений развития настоящего исследования является модельная оценка возможных изменений стока и выноса биогенных элементов с лесных водосборов в результате климатических изменений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовом обеспечении за счет средств федерального бюджета в рамках проекта FP7 ERA — Net Sumforest-POLYFORES (идентификатор проекта RFMEFI61618X0101), средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН), а также темы № 0154-2019-0001 государственного задания Института озероведения РАН «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Acknowledgments

This work was financially supported by the federal budget in the framework of the FP7 ERA project – Net Sumforest-POLYFORES (project identifier RFMEFI61618X0101), federal budget funds to fulfill the state task of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Forest Institute of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences), and 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."

Список литературы

1. *Крестовский О.И.* Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 118 с.
2. *Федоров С.Ф.* Определение транспирации еловыми насаждениями по коэффициенту транспирационной активности // Труды ГГИ. 1981. Вып. 279. С. 32—34.
3. *Карпечко Ю.В., Лозовик П.А., Федорец Н.Г.* Баланс химических элементов в сосняке и ельнике Карелии // Лесоведение. 2018. № 2. С. 107—118.
4. *Кондратьев С.А., Карпечко Ю.В., Шмакова М.В., Расулова А.М., Родионов В.З.* Опыт экспериментальных исследований и математического моделирования воздействий вырубки леса и последующего лесовосстановления на сток и вынос химических веществ с лесных водосборов // Региональная экология. 2019. № 1 (55). С. 25—53. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-1-25-53.
5. *Федоров С.Ф., Марунич С.В.* Гидрологическая роль леса // Обзорная информация. Сер. Гидрология суши. 1985. Вып. 2. Обнинск: изд-во ВНИИГМИ — МЦД. 43 с.
6. Лесохозяйственный регламент Пудожского лесничества Республики Карелия на 2012—2021 гг. Петрозаводск, 2011. 149 с.
7. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Детерминированно-стохастическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоем // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 4. С. 55—65.
8. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор — водоток — водоем. СПб: Нестор-История, 2019. 246 с.
9. *Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю.* Моделирование абиотических процессов в системе водосбор — водоем (на примере Чудско-Псковского озера). СПб: Нестор-История, 2010. 116 с.

10. *Кондратьев С.А., Арвола Л., Хакала И., Алябина Г.А., Маркова Е.Г.* Оценка стока воды, выноса фосфора и органического вещества с малых водосборов Северо-Запада России и Финляндии (по данным математического моделирования) // Известия РГО. 2003. Т. 135, вып. 6. С. 29—36.
11. *Карпечко Ю.В., Мясникова Н.А.* Расчет фитомассы древостоя // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 4 (125). С. 77—81.
12. *Карпечко Ю.В., Мясникова Н.А.* Особенности формирования листового аппарата и транспирации хвойного древостоя // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2014. № 4 (141). С. 78—84.
13. *Карпечко Ю.В., Кондратьев С.А., Родионов В.З., Шмакова М.В.* Особенности формирования испарения в различных по возрасту, условиям произрастания и продуктивности лесах // Гидрометеорология и экология (Ученые записки РГГМУ). 2020 № 1 (58). С. 49—67.
14. *Хрисанов Н.И., Осипов Г.К.* Управление эвтрофированием водоемов. Л.: Гидрометеоиздат, 1993. 277 с.+
15. *Parzych A., Trojanowski J.* Precipitation and duff fall as natural sources of nitrogen and phosphorus for forest soils in the Slowinski National Park // Baltic coastal zone. 2006. No 10. P. 47—59.
16. *Ukonmaanaho L., Merilä P., Nöjd P., Tiina M. Nieminen T.M.* Litterfall production and nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland // Boreal Environment Research. 2008. No 13. P. 67—91.
17. *Niinemets Ü, Tamm Ü* Species differences in timing of leaf fall and foliage chemistry modify nutrient resorption efficiency in deciduous temperate forest stands // Tree Physiology. No 25. P. 1001—1014.
18. *Федорец Н.Г., Бахмет О.Н.* Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2003. 240 с.
19. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Маркова Е.Г., Лозовик П.А., Брюханов А.Ю., Чичкова Е.Ф.* Биогенная нагрузка на Онежское озеро от рассеянных источников по результатам математического моделирования // Известия РГО. 2016. Т. 148, вып. 5. С. 53—63.

References

1. *Krestovskij O.I. Vliyanie vyrubok i vosstanovleniya lesov na vodnost' rek.* Impact of deforestation and reforestation on river water availability. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1986: 118 p. [In Russian].
2. *Fedorov S.F.* Determination of transpiration by spruce stands by the coefficient of transpiration activity. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta.* Proceedings of the State Hydrological Institute. Proc. 1. 1981, 279: 32—34. [In Russian].
3. *Karpechko YU.V., Lozovik P.A., Fedorec N.G.* Balance of chemical elements in the pine and spruce forests of Karelia. *Lesovedenie*. Forest science. 2018, 2: 107—118. [In Russian].
4. *Kondratyev S.A., Karpechko YU.V., SHmakova M.V., Rasulova A.M., Rodionov V.Z.* Experience of experimental research and mathematical modeling of impacts of deforestation and subsequent reforestation on the flow and removal of chemicals from forest catchments. *Regional'naya ekologiya*. Regional ecology. 2019, 1 (55): 25—53. [In Russian].
5. *Fedorov S.F., Marunich S.V.* The hydrological role of the forest. Overview information. Series: hydrology of the land. Issue 2. Obninsk, 1985: 43 p. [In Russian].
6. *Lesohozyajstvennyj reglament Pudozhskogo lesnichestva Respubliki Kareliya na 2012—2021 gg.* Forestry regulations of the Pudozhsky forest district of the Republic of Karelia for 2012—2021. Petrozavodsk, 2011: 149 p. [In Russian].
7. *Kondratyev S.A., SHmakova M.V.* Deterministic-stochastic modeling of mass transfer in the catchment-reservoir system. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika.* Fundamental and Applied Hydrophysics. 2018, 11 (4): 55—65. [In Russian].
8. *Kondratyev S.A., SHmakova M.V. Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v sisteme vodosbor — vodotok — vodoem.* Mathematical modeling of mass transfer in the catchment — watercourse — reservoir system. SPb: Nestor-Hystory. 2019: 246 p. [In Russian].
9. *Kondratyev S.A., Golosov S.D., Zverev I.S., Ryabchenko V.A., Dvornikov A.Yu. Modelirovanie abioticheskih processov v sisteme vodosbor — vodoem (na primere CHudsko-Pskovskogo ozera).* Modeling of

abiotic processes in the catchment-reservoir system (on the example of Lake Peipsi). SPb: Nestor-History. 2010: 116 p. [In Russian].
10. *Kondratyev S.A., Arvola L., Hakala I., Alyabina G.A., Markova E.G.* Estimation of water runoff, removal of phosphorus and organic matter from small catchments in the North-West of Russia and Finland (based on mathematical modeling data). *Izvestiya RGO.* News of RGS. 2003, 135 (6): 29—36. [In Russian].
11. *Karpechko YU.V., Myasnikova N.A.* The calculation of the phytomass of the forest. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta.* Scientific notes of Petrozavodsk state University. A series of "Natural and technical Sciences". 2012, 4 (125): 77—81. [In Russian].
12. *Karpechko YU.V., Myasnikova N.A.* Features of leaf formation and transpiration of coniferous stands. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta.* Scientific Notes of Petrozavodsk State University. A series of "Natural and technical Sciences". 2014, 4 (141): 78—84. [In Russian].
13. *Karpechko YU.V., Kondratyev S.A., Rodionov V.Z., SHmakova M.V.* Features of evaporation formation in forests of different age, growth conditions and productivity. *Gidrometeorologiya i ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology. 2020, 1 (58): 49—67. [In Russian].
14. *Hrisanov N.I., Osipov G.K. Upravlenie evtrofirovaniem vodoemov.* Control of eutrophication of reservoirs. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1993: 277 p. [In Russian].
15. *Parzych A., Trojanowski J.* Precipitation and duff fall as natural sources of nitrogen and phosphorus for forest soils in the Slowinski National Park. Baltic coastal zone. 2006, 10: 47—59.
16. *Ukonmaanaho L., Merilä P., Nöjd P., Tiina M. Nieminen T.M.* Litterfall production and nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland. Boreal Environment Research. 2008, 13: 67—91.
17. *Niinemets Ü., Tamm Ü.* Species differences in timing of leaf fall and foliage chemistry modify nutrient resorption efficiency in deciduous temperate forest stands. Tree Physiology. 25: 1001—1014.
18. *Fedorec N.G., Bahmet O.N. Ecological features of transformation of carbon and nitrogen compounds in forest soils.* Ecological features of transformation of carbon and nitrogen compounds in forest soils. Petrozavodsk: KarSC RAS. 2003: 240 p. [In Russian].
19. *Kondratyev S.A., SHmakova M.V., Markova E.G., Lozovik P.A., Bryukhanov A.YU., Chichkova E.F.* Nutrient load on Lake Onega from diffuse sources according to the results of mathematical modeling. *Izvestiya RGO.* Proc. of the Russian Geographical Society. 2016. 148 (5): 53—63. [In Russian].

Статья поступила 23.04.2020
Принята к публикации 04.06.2020

Сведения об авторах

Кондратьев Сергей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией математических методов моделирования Института озероведения РАН, kondratyev@limno.org.ru

Карпечко Юрий Васильевич, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник Института леса Карельского научного центра РАН, karp@nwpi.krc.karelia.ru

Шмакова Марина Валентиновна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории математических методов моделирования Института озероведения РАН, m-shmakova@yandex.ru

Information about authors

Kondratyev Sergei Alekseevich, Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), chief of the laboratory of mathematical modeling methods of the Institute of Zimnology of RAS

Karpechko Yury Vasilievich, Grand PhD (Geog. Sci.), lead researcher of Institute of Forest, Karelia Research Center RAS

Shmakova Marina Valentinovna, PhD (Tech. Sci.), senior researcher of the laboratory of mathematical modeling methods of the Institute of Limnology of RAS