

## АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ МНОГОЛЕТНЕЕ ИЗМЕНЕНИЕ СТОКА С ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ

**В.И. Батуев, И.Л. Калюжный**

E-mail: hfl@mail.ru

*ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия*

**АННОТАЦИЯ:** В статье представлены результаты анализа взаимодействия факторов, обуславливающих процесс формирования зимнего и весеннего стока на основе комплексных гидрометеорологических наблюдений на олиготрофных болотах Ламмин-Суо (Ленинградская обл.) и Иласское (Архангельская обл.) в периоды стабилизации (1950–1980 гг.) и изменения климата (1981–2018 гг.). Установлено, что глубина промерзания является фактором, регулирующим соотношение зимнего и весеннего стока. Показано, что при ее уменьшении возрастает слой зимней стокоформирующей влаги, и, как следствие, возрастает зимний и уменьшается весенний сток.

Анализ результатов наблюдений за гидрометеорологическим режимом болот севера и северо-запада России показал, что именно 1978–1980 гг. являются тем рубежом, с которого наблюдается уменьшение глубины промерзания и изменение характеристик стока с болот.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** олиготрофные болота, климатические изменения, потери снеготпасов, стокоформирующая влага, сток.

На территории России во второй половине XX в. наблюдался рост температуры воздуха, атмосферных осадков и стока в речных системах. В работе [1] впервые показано, что наиболее интенсивные изменения речного стока происходили на рубеже 1980–1981 гг. На болотах, как на слагающих компонентах подстилающей поверхности речных водосборов, этот рубеж проявляется со всей очевидностью [2]. Механизм изменения стока при климатических изменениях рассмотрен в работе [3].

На процесс формирования гидрологического режима болотных массивов действуют два рода факторов – внешней и внутренней среды. Факторами внешней среды являются температура приземного слоя воздуха и атмосферные осадки. Внутренние факторы обусловлены гидрофизическими процессами, происходящими в деятельном слое болот и его физическими характеристиками.

На рубеже 1978–1980 гг. началось интенсивное изменение гидрометеорологического режима болот севера и северо-запада Российской Федера-

ции. Увеличилась среднегодовая температура воздуха приземного слоя на 1,2–1,3 °С и температура деятельного слоя болот на 0,6–0,8 °С, что, наряду с уменьшением запасов воды в снеге, способствовало уменьшению глубины их промерзания в среднем на 30 %. Как следствие, уменьшилось содержание законсервированной влаги в мерзлом слое торфяной залежи и увеличились объемы стокоформирующей влаги. В статье представлен анализ факторов, обуславливающих многолетние изменения стока с болотных массивов.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения анализа и оценки влияния климатических изменений на водный режим болот рассмотрены результаты комплексных многолетних наблюдений на двух олиготрофных болотных массивах севера и северо-запада Российской Федерации:

– Ламмин-Суо, провинции средней тайги и выпуклых болот юго-восточной Финляндии и Карельского перешейка, где гидрометеорологические наблюдения ведет Зеленогорская болотная станция (ФГБУ ГГИ);

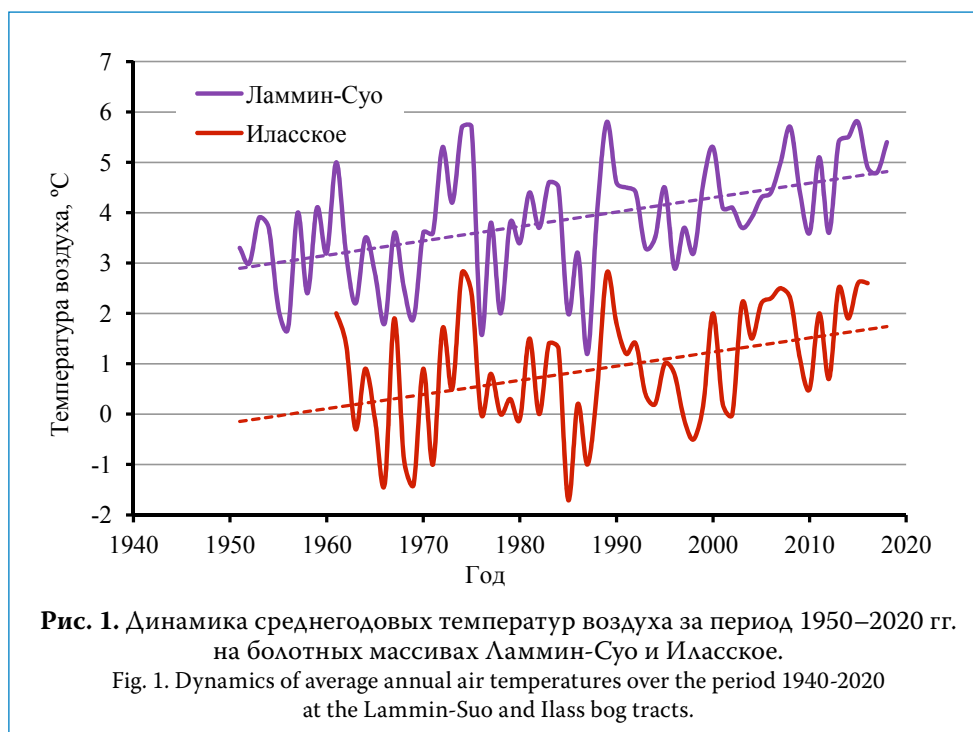
– Иласском, Прибеломорской провинции олиготрофных болот северной тайги, где мониторинг осуществляется на болотной станции Брусовица (Северное УГМС).

Особенностью олиготрофных болот является то обстоятельство, что их водное питание осуществляется только за счет атмосферных осадков. Олиготрофные болота на Европейской территории России занимают до 90 % от общей площади болот. В связи с этим, репрезентативность проведения гидрометеорологических наблюдений на болотах для регионов севера и северо-запада очевидна. Комплексные гидрометеорологические наблюдения за весь период наблюдений на специализированных болотных станциях проводились по единой программе и методикам, принятым в системе Росгидромета. Во все периоды производства работ местоположение пунктов наблюдений оставалось неизменным.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### **Анализ факторов внешней среды, влияющих на формирование стока с болот.**

Первопричиной изменений гидрометеорологического режима болотных массивов являются изменения температурного режима в их приземном слое и количества атмосферных осадков. Анализ результатов наблюдений в форме линейных трендов, приведенных на рис. 1, однозначно свидетельствует, что с 1950 по 2018 гг. на болоте Ламмин-Суо и с 1960 по 2014 гг. на Иласском болоте возрастает среднегодовая температура воздуха. Наблюдается отчетливая синхронность в динамике приземных температур. Оценка значимости рассматриваемых в статье трендов проводилась согласно рекомендациям [4].



Ряды годовых температур воздуха на болотах Ламмин-Суо и Иласское можно представить в виде двух отрезков: период относительной стабильности климатических характеристик (до 1980 г.) и период их существенных изменений (с 1981 г.). Результаты сравнения годовых температур за эти периоды показывают повышение среднегодовой температуры на болоте Ламмин-Суо на 0,8 °С, на Иласском – на 0,6 °С.

Изменение температуры воздуха на болотах происходит во всех фазах гидрологического года. Наиболее активно изменения наблюдаются в зимний период. Из табл.1 следует, что средняя температура зимы повысилась на болоте Ламмин-Суо на 1,4 °С, на Иласском – на 1,1 °С. По отношению к периоду стабилизации климатических характеристик за последнее тридцатилетие в северо-западной части зоны олиготрофных болот средняя температура торфяной залежи увеличилась на 0,6 °С, в северной части ее рост составил 0,8 °С [5]. Таким образом, во втором периоде наблюдалось уменьшение воздействия низких температур на торфяную залежь, что способствовало уменьшению глубины промерзания болот.

Установлено, что при общем изменении климатических характеристик, количество атмосферных осадков возрастает (табл. 2). Среднегодовое количество

их величина на болоте Ламмин-Суо увеличилась на 95 мм (11,7 %) от средней годовой величины периода стабилизации климатических характеристик. Эти же величины для Иласского болота составляют 34 мм (4,5 %).

**Таблица 1.** Среднемноголетняя и среднезимняя температуры воздуха на болотах Ламмин-Суо и Иласское за период стабилизации и период изменения климатических характеристик

Table 1. Average long-term annual and winter air temperatures at Lammin-Suo and Ilass bogs over the period of stabilization and the period of climatic characteristics changes

Болото	Период		Изменение характерных температур за два периода
	до 1980 г.	с 1981 г.	
Среднемноголетняя температура воздуха, °С			
Ламмин-Суо	3,4	4,2	0,8
Иласское	0,5	1,1	0,6
Среднезимняя температура воздуха, °С			
Ламмин-Суо	– 6,3	– 4,9	1,4
Иласское	– 10,2	– 9,1	1,1

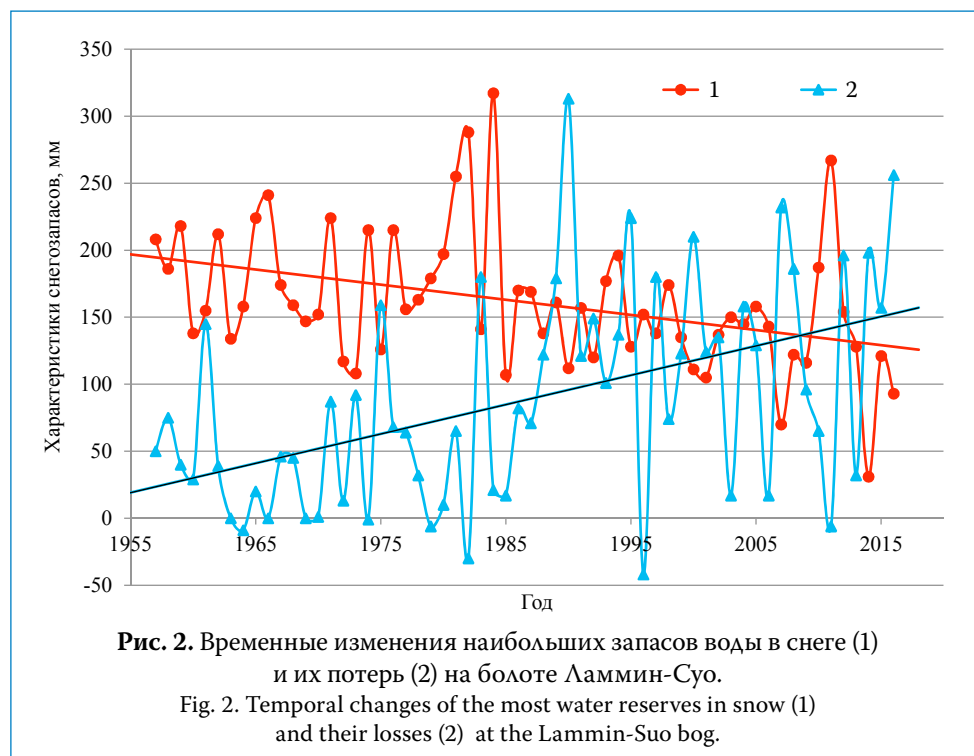
Сравнительный анализ количества атмосферных осадков за зимний период (декабрь–март) также показывает их увеличение: на болоте Ламмин-Суо среднемноголетняя величина осадков зимнего периода увеличилась на 56 мм (25,8 %), на Иласском – на 14 мм (8,7 %) (табл. 2). Как следствие, на этих болотных массивах должно наблюдаться и увеличение ежегодных зимних запасов воды в снеге (максимальных снегозапасов), однако многолетняя динамика показывает устойчивый тренд на уменьшение. На рис. 2 приведены динамика наблюденных максимальных запасов воды в снеге и потери влагозапасов на болоте Ламмин-Суо в виде их разности от выпавших осадков за период формирования наибольших снегозапасов (декабрь–март).

Потери снегозапасов во втором временном периоде неуклонно возрастают. В табл. 3 приведены среднемноголетние характеристики величин снегозапасов и их потерь за два рассматриваемых климатических периода. Тренд потерь снегозапасов на болоте Ламмин-Суо характеризуется уравнением испарения снежного покрова при оттепелях. Уменьшение общего запаса воды в снеге во время оттепелей за счет водоотдачи значительно превосходит величину испарения. Среднемноголетняя максимальная интенсивность снеготаяния на Европейской территории России составляет от 20 до 36 мм/сут [6]. Испарение при оттепелях в среднем – от 0,3 до 0,5–0,6 мм/сут [6, 7].

**Таблица 2.** Среднегодовое значение сумм годовых и зимних атмосферных осадков на болотах Ламмин-Суо и Иласское за периоды относительной стабильности (до 1980 г.) и изменения климатических характеристик (с 1981 г.), мм

Table 2. Average long-term value of annual and winter atmospheric precipitations at the Lammin-Suo and Ilass bogs over the periods of relative stability (before 1980) and changing of climatic characteristics (from 1981), mm

Болото	Период		Изменение за период
	до 1980 г.	с 1981 г.	
Среднегодовое значение сумм годовых осадков			
Ламмин-Суо	810	905	+95
Иласское	669	699	+30
Среднегодовое значение сумм зимних осадков			
Ламмин-Суо	217	273	+56
Иласское	161	175	+14



**Таблица 3.** Среднемноголетние величины наибольших запасов воды в снеге на болотах и их потерь при оттепелях, мм  
Table 3. Average long-term values of the most water reserves in snow at bogs and their losses at thaw, mm

Болото	Период		Изменение за период
	до 1980 г.	с 1981 г.	
Среднемноголетняя величина наибольших запасов воды в снеге			
Ламмин-Суо	179	153	-26
Иласское	138	149	+11
Среднемноголетняя величина потерь снеготопавки в период оттепелей			
Ламмин-Суо	40	120	+80
Иласское	22	26	+4

Изменение температурного режима в сторону потепления неизбежно приводит к изменению физических характеристик снежного покрова. Под воздействием оттепелей возрастает плотность, уменьшается высота снежного покрова, увеличивается величина испарения, при глубоких оттепелях наблюдается водоотдача из снега. На болотных массивах происходит смещение даты наступления наибольших снеготопавки с середины марта на более ранние сроки. При увеличении интенсивности изменения климатических параметров возрастают и потери запасов воды в снеге, что способствует заметному уменьшению талого стока в весенний период.

#### **Анализ гидрофизических процессов и факторов внутренней среды, влияющих на формирование стока с болот**

Воздействие климатических изменений, обусловленных повышением температуры внешней среды, изменяет тепло-массообмен в деятельном слое почвы и уменьшает глубину промерзания [8, 9]. Глубина промерзания является определяющим фактором, обуславливающим сток с болотных массивов в зимний период. Во-первых, она препятствует проникновению воздуха в торфяную залежь, во-вторых, содержащийся в промерзшей зоне слой влаги, называемый приведенным слоем, исключается из процесса формирования зимнего стока с болотного массива.

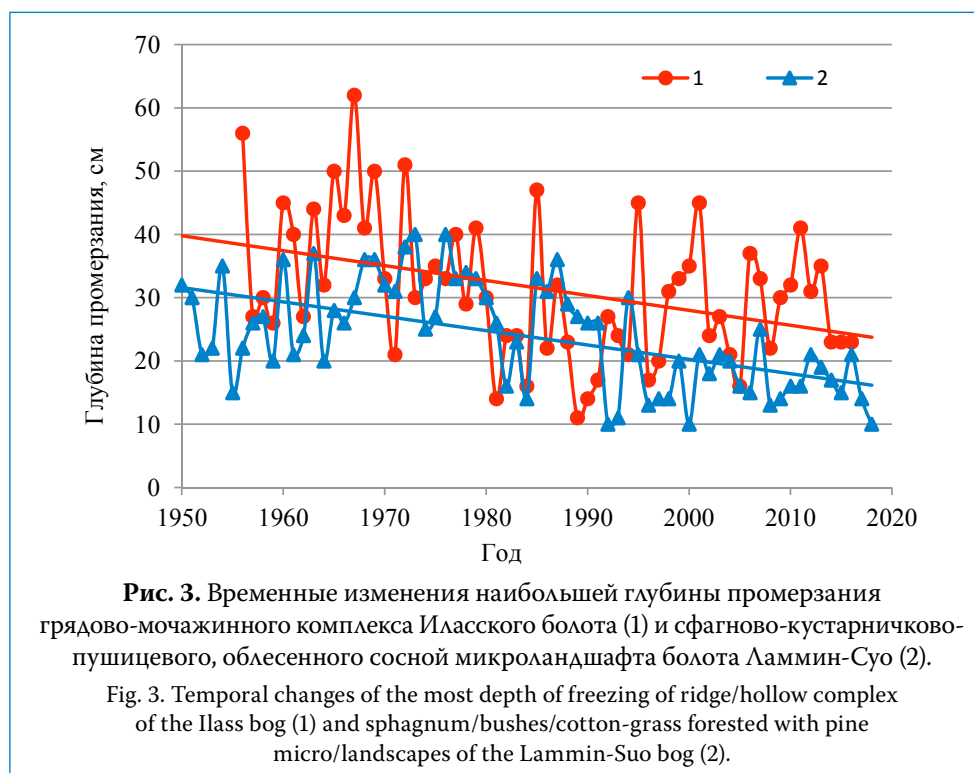
Установлено, что в начальный период промерзания, когда мощность снежного покрова незначительна, температура воздуха является определяющим фактором промерзания для всех типов болот. В это время наблюдается наибольшая интенсивность промерзания: 5–8 мм/сут и больше. Но при толщине снежного покрова больше 15 см, интенсивность промерзания

значительно снижается и не превышает 2–3 мм/сут. Соответствующие зависимости отмечены на всех типах болотных массивов.

По данным наблюдений с 1970 по 1990 гг. в грядово-озерковом комплексе Иласского болота при полностью сформировавшемся промерзшем слое в конце периода промерзания зависимость наибольшей глубины промерзания (см) гряд и озерков (hg.o) от высоты снега (H) имеет высокий коэффициент корреляции ( $R = 0,80$ ) и определяется уравнением вида  $hg.o = -0,655H + 63,5$ .

В начальный период промерзания болота мерзлый слой не оказывает существенного влияния на формирование зимнего стока, т. к. количество исключенной из процесса формирования влаги в мерзлом слое незначительно. Устойчивый снежный покров снижает интенсивность промерзания залежи. В мягкие зимы, при больших величинах снегозапасов, процесс промерзания практически прекращается.

На рис. 3 приведены временные изменения глубин промерзания отдельных микроландшафтов за период наблюдений на болотах Ламмин-Суо и Иласское. Во временном ходе, начиная с 1980 г., отчетливо прослеживаются тренды на уменьшение глубины промерзания.





Для конкретного болота свойственна высокая корреляция между глубиной промерзания разных болотных микроландшафтов. На Иласском болоте коэффициент корреляции промерзания между микроландшафтами равен 0,82, на Ламмин-Суо – 0,75. Из этого следует, что их тренды с большой вероятностью имеют тенденцию к уменьшению глубины промерзания для всей зоны олиготрофных болот севера и северо-запада.

Осредненные глубины промерзания болот и их экстремальные характеристики за рассматриваемые климатические периоды на севере и северо-западе приведены в табл. 4. Ее анализ показывает уменьшение глубин промерзания на 25 % (Иласское) и 35 % (Ламмин-Суо). В отдельные годы периода климатических изменений наблюдается рост максимальных глубин промерзания мочажин. Этому способствует совокупное воздействие на процесс промерзания двух факторов – большой обводненности мочажин и небольшой высоты снежного покрова. Первый фактор увеличивает содержание льда, вследствие чего увеличивается теплопроводность деятельного слоя мочажин и резко возрастает глубина их промерзания. Второй фактор, вследствие потерь снеготпасов, не оказывает существенного теплоизолирующего эффекта на процесс промерзания. При стабилизации климатических изменений потери снеготпасов минимальны и такого аккумулирующего эффекта не наблюдается или он проявляется редко и слабо.

Начало промерзания болота Ламмин-Суо в период стабилизации климатических характеристик в 40 % случаев наблюдалось с середины октября по середину ноября. Во втором периоде эти даты смещаются в 57 % случаев на первые декады ноября. Полное оттаивание мерзлого слоя при условиях более раннего промерзания отмечено во второй половине апреля (56 %) и в первой половине мая (34 %). Во втором периоде мерзлый слой в конце апреля не наблюдался уже в 60 % случаев. Продолжительность существования мерзлого слоя на болотах севера и северо-запада изменяется от 194–200 сут на северных до 100–135 сут на южных границах олиготрофной зоны.

Между глубиной промерзания и приведенным слоем промерзания существует тесная зависимость, обусловленная высоким содержанием капиллярной влаги в деятельном слое болота. Содержание влаги в пористой структуре торфа не позволяет ее избыткам накапливаться при выпадении осадков выше равновесного состояния. В связи с этим, при промерзании деятельного слоя, коэффициент корреляции между глубиной промерзания и приведенным слоем (т. е. содержанием воды в мерзлом слое) близок к единице. К концу зимнего периода наибольшей глубине промерзания соответствует и наибольшая величина приведенного слоя. Более детально такие зависимости рассмотрены в работе [10]. Зная глубину промерзания,



**Таблица 4.** Характеристики глубины промерзания олиготрофных болот севера и северо-запада за периоды стабилизации и изменения климата  
 Table 4. Characteristics of the oligotrophic bogs freezing depth of the north and the north-east over the periods of climate stabilization and changes

Период наблюдений, гг.	Глубина промерзания элементов микрорельефа, см					
	повышение			понижение		
	среднее	max	min	среднее	max	min
<b>Иласское болото</b>						
грядово-мочажинный комплекс						
1956 – 1980	38	62	21	52	80	26
1981 – 2016	27	47	11	40	87	17
Уменьшение промерзания	11	15	10	12	+7	9
грядово-озерковый комплекс						
1970 – 1980	29	40	22	49	63	36
1981 – 2016	23	39	8	38	54	13
Уменьшение промерзания	6	1	14	11	9	23
<b>Болото Ламмин-Суо</b>						
сфагново-кустарничково-пушицевый, облесенный сосной						
1950 – 1980	29	40	15	15	30	2
1981 – 2018	16	31	7	12	28	2
Уменьшение промерзания	13	9	8	3	2	0
сфагново-кустарничково-пушицево-сосновый						
1950 – 1980	21	32	13	12	24	4
1981 – 2018	16	31	7	12	28	1
Уменьшение промерзания	5	1	6	0	+4	3
грядово-мочажинный комплекс						
1949 – 1980	23	34	11	21	42	8
1981 – 1991	16	26	8	16	22	6
Уменьшение промерзания	7	8	3	5	20	2

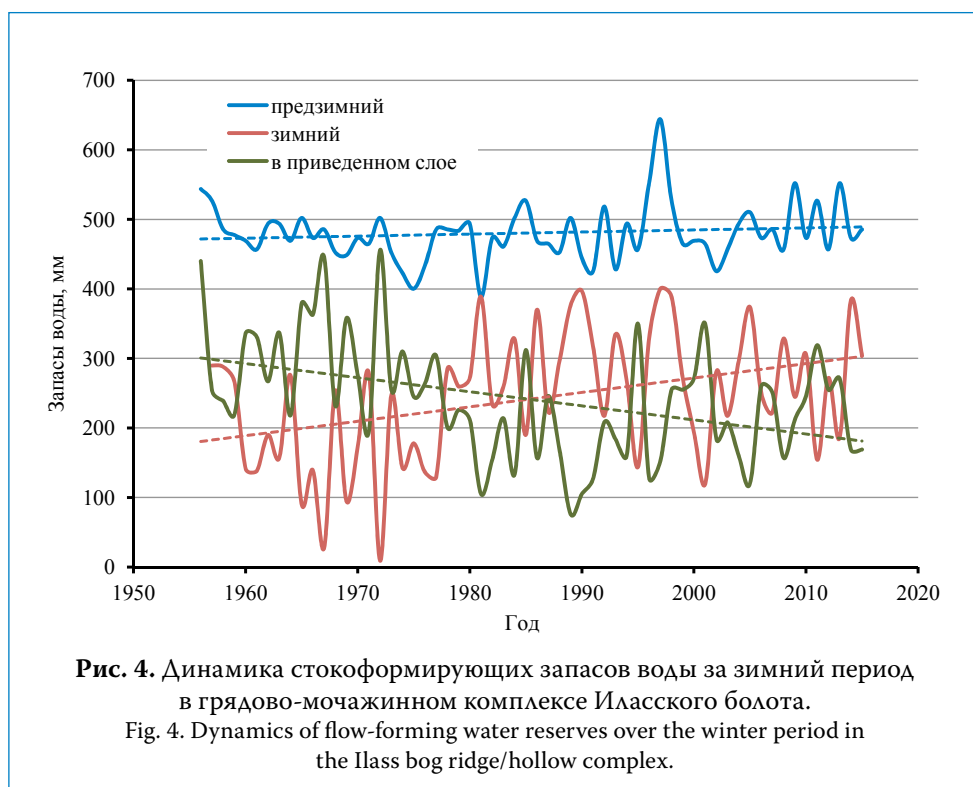
можно определить величину влаги в промерзшем слое. Влага, содержащаяся в этом слое, исключается из процесса формирования зимнего стока. Как следствие, при уменьшении глубины промерзания возрастает количество влаги, участвующей в формировании зимнего стока. Численно для каждого конкретного года количество этой влаги равно разности между ее предзимними запасами и влагой, находящейся в мерзлом слое. Предзимние влагозапасы рассчитываются по предзимнему уровню воды в центральной части болота согласно методике, изложенной в работе В.В. Романова [11]. В табл. 5 представлена временная изменчивость стокоформирующей влаги и аккумуляированных масс воды в мерзлом слое центральной части болота Ламмин-Суо и грядово-мочажинном комплексе болота Иласское за два рассматриваемых периода.

**Таблица 5.** Трансформация стокоформирующих влагозапасов на болотах Ламмин-Суо и Иласское за период климатических изменений, мм  
Table 5. Transformation of the flow-forming water reserves at the Lammin-Suo and Ilass bogs over the period of climatic changes, mm

Предзимние влагозапасы			Приведенный слой			Зимняя стокоформирующая влага		
средние	max	min	средние	max	min	средние	max	min
<b>Болото Ламмин-Суо</b>								
период стабилизации, 1951–1980 гг.								
468	500	388	134	224	58	334	397	262
период изменений, 1981–2018 гг.								
482	512	425	106	200	41	376	455	264
изменение характеристик влагозапасов								
+14	+12	+37	–28	–24	–17	+42	+58	+2
<b>Иласское болото</b>								
период стабилизации, 1956–1980 гг.								
475	544	400	295	456	195	186	290	9
период изменений, 1981–2015 гг.								
484	644	389	197	350	76	283	400	119
изменение характеристик влагозапасов								
+9	+100	+11	–98	–106	–119	+97	+110	+110

Предзимние влагозапасы на болоте Ламмин-Суо за период климатических изменений увеличились в среднем с 468 до 482 мм, т. е. всего на 14 мм (2,8 %). В то же время, зимняя стокоформирующая влага за этот период возросла с 334 до 376 мм, что соответствует 12,6 %. Основной вклад в это увеличение вносится уменьшением глубины промерзания и, как следствие, уменьшением аккумулярованной влаги в мерзлом слое. Последняя характеристика, выраженная в виде приведенного слоя, уменьшилась на 28 мм, что составляет 21 % от первоначальной величины (134 мм). Увеличение зимней стокоформирующей влаги при относительно небольшой глубине промерзания полностью исключило возможность установления на болотах зимних бессточных периодов.

Динамика стокоформирующих запасов воды за зимний период на Иласском болоте приведена на рис. 4. За последнее тридцатилетие на болоте наблюдается незначительное увеличение предзимних запасов влаги и устойчивое уменьшение законсервированной влаги в мерзлом слое. С учетом уменьшения величины приведенного слоя возрастает количество влаги, участвующей в формировании зимнего стока.



Сток с болотного массива в зимний период может наблюдаться только в том случае, когда физические свойства деятельного слоя позволяют образовать проточную зону. При отсутствии мерзлого слоя ее мощность определяется расстоянием от поверхности болота до горизонта торфяной залежи с коэффициентами фильтрации, близкими к нулю. По наблюдениям на болотах северо-западных и северных районов олиготрофной зоны сток прекращается, когда уровень болотных вод на пониженных элементах микрорельефа достигает, соответственно, 30–32 и 31–36 см от поверхности микроландшафта. Исходя из этого, за нижнюю границу проточной зоны относительно поверхности пониженных элементов микрорельефа на болотах Ламмин-Суо и Иласское приняты значения 30 и 33 см соответственно.

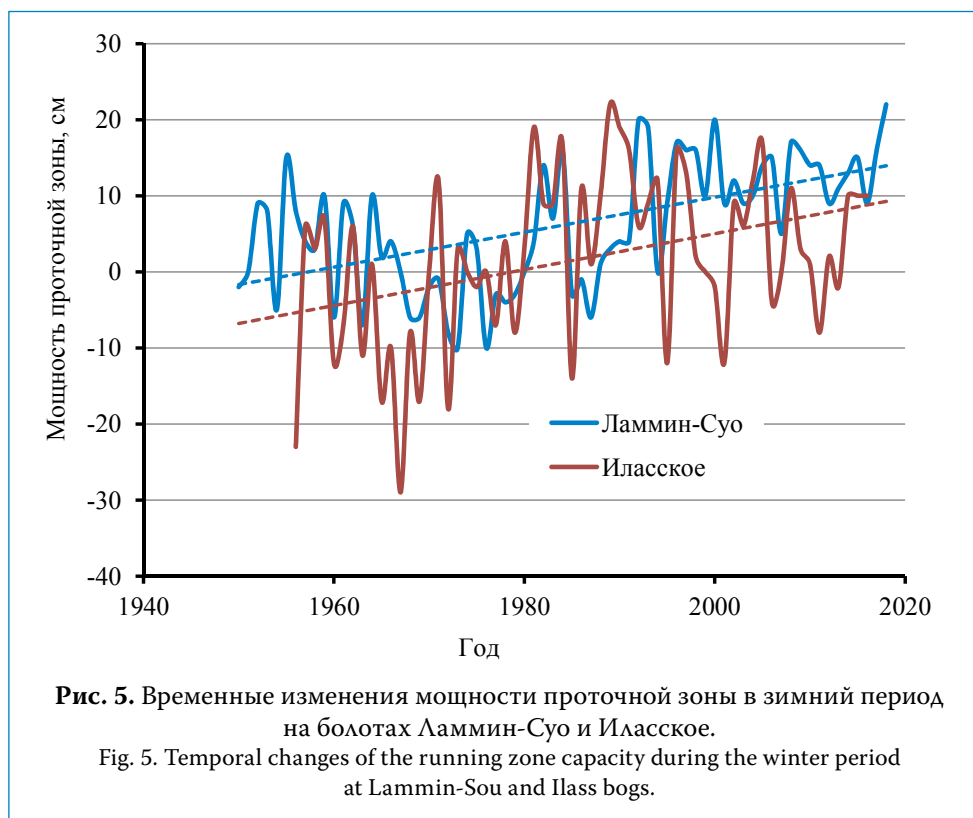
В условиях промерзающего деятельного слоя, его верхняя граница ограничена нижней границей промерзшего слоя торфа. Если нижняя граница промерзшей зоны опускается ближе к слою торфа с коэффициентами фильтрации равными нулю, зимний сток с болота прекращается.

За первый период наблюдений (до 1980 г.) проточная зона на болоте Ламмин-Суо отсутствовала в 17 случаях, что составляет 55 % от общего числа лет наблюдений. В 45 % случаев средняя толщина проточной зоны составляла 7 см, изменяясь от 2 до 15 см. В последующий период она не наблюдалась только в четырех случаях, в 34 случаях (90 %) в среднем была равна 22 см, изменяясь от 1 до 22 см. Мощность проточной зоны за период климатических изменений увеличилась в три раза, а вероятность ее наличия в зимний период возросла вдвое. За период климатических изменений глубина промерзания мочажин всегда была меньше 30 см, т. е. прекращения стока при промерзании деятельного слоя не наблюдалось.

В период относительной стабильности климата на Иласском болоте из 25 лет наблюдений в 16 зимних сезонах (64 % случаев) проточная зона отсутствовала и только в девяти случаях (36 %) она устанавливалась со средней мощностью 5 см. В последующий период при изменении климатических характеристик проявление проточной зоны наблюдается в 80 % случаев, при ее средней мощности 10 см. Частота образования проточной зоны увеличилась в 2,2 раза.

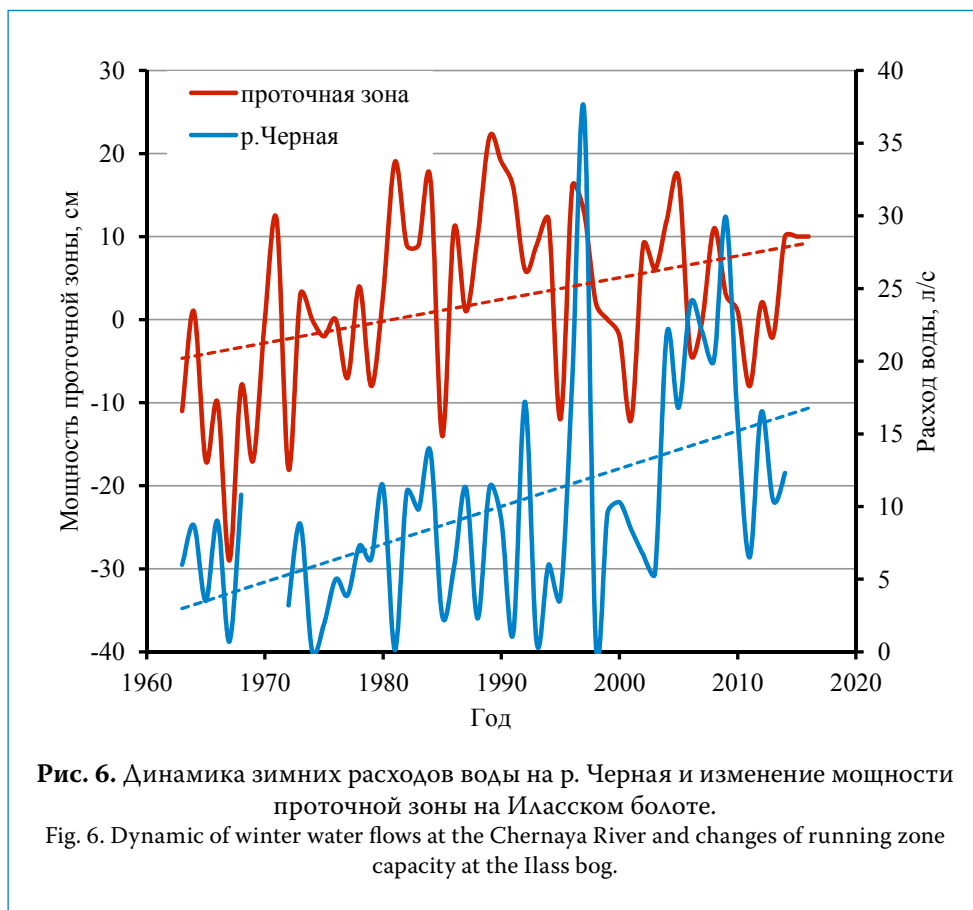
На рис. 5 приведена динамика мощности проточных зон в зимний период за все годы наблюдений на болотах Ламмин-Суо и Иласское. Линейные тренды показывают, что нарастание мощности проточной зоны на болотах происходило с одинаковой интенсивностью. Отрицательное значение величины проточной зоны означает, насколько глубина промерзания превышает среднюю нижнюю границу, соответствующую величине прекращения стока с болота зимой.

Тенденция в изменении величин зимнего стока на р. Черная, которая дренирует Иласское болото, соотносится с динамикой мощности проточных зон, что показано на рис. 6. Увеличение ее мощности совпадает с увеличением зимнего стока. Динамика расходов воды показывает, что за период относительной стабильности климата они изменялись незначительно – от 0,05 до 11,4 л/с. Средняя величина зимних расходов составляла 5,8 л/с. Для последующего периода средняя величина зимних расходов воды возросла до 11,7 л/с, а диапазон их изменения составил 0,15–37,3 л/с.

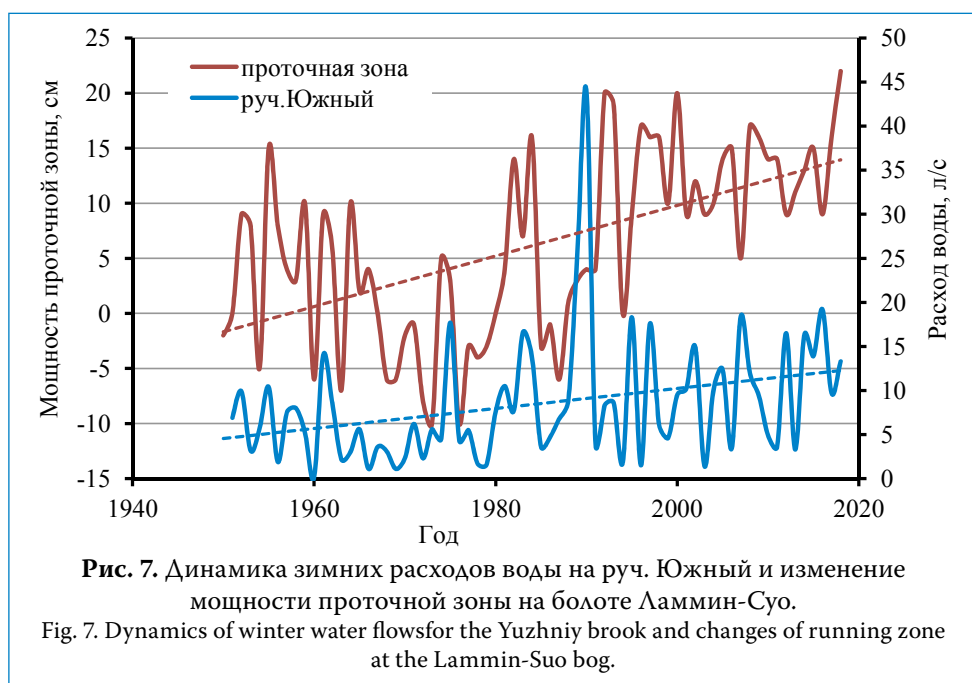


Значительно уменьшилось число зимних периодов с прекращением стока. В период 1963–1980 гг. отсутствие стока наблюдалось в 56 % случаев, при средней продолжительности отсутствия стока 58 сут. В последующий период отсутствие стока отмечено лишь в 35 % случаев со средней продолжительностью 45 сут. Данное обстоятельство сказалось на формировании максимальных расходов воды весеннего половодья: средняя их величина сократилась с 1820 до 1700 л/с.

Сопоставление динамики роста зимних расходов воды на руч. Южный, дренирующем болото Ламмин-Суо, и мощности проточной зоны показывает аналогичную ситуацию (рис. 7). Результаты наблюдений свидетельствуют, что зимний сток на ручье увеличился с 3,6 до 9,2 л/с, т. е. в 2,6 раза. Диапазон изменения стока в первый период составлял от 0 до 17 л/с, а во втором периоде варьировал от 0,5 до 49,4 л/с.



Значительное увеличение зимнего стока также обуславливает уменьшение весенних максимальных расходов воды. Происходит определенное внутригодовое перераспределение стока. Если в период относительной стабильности климатических характеристик средний наибольший расход весеннего половодья составлял 862 л/с, то в последующий период он уменьшился на 33,6 %.



**Таблица 5.** Характерные зимние расходы воды по ручью Южный за период стабилизации климата и при его последующих изменениях с 1980 г., л/с  
 Table 5. Typical winter water flows for the Yuzhniy brook over the period of climate stabilization and its subsequent changes from 1980, l/s

Характеристика	Средний расход воды за зимние месяцы	Наибольший расход воды весеннего половодья	Наименьший расход воды за зимние месяцы
Период стабилизации, 1950–1980 гг.			
Средняя	3,6	360	0,7
Наибольшая	17,4	862	2,3
Наименьшая	0,0	78,6	0,0
Период изменений, 1981–2018 гг.			
Средняя	9,2	188	1,7
Наибольшая	49,4	572	5,0
Наименьшая	0,5	53,1	0,0
Разность стоковых характеристик за два периода			
Средняя	5,6	-172	1,0
Наибольшая	32,0	-290	2,7
Наименьшая	0,5	-25,5	0,0



Характерные зимние расходы воды за периоды относительной стабильности и изменения климата по руч. Южный приведены в табл. 5. Анализ наблюдений показывает, что средние расходы за зимние месяцы увеличились от первоначальной величины в 2,6 раза. Наибольшие расходы весеннего половодья уменьшились в 1,5 раза, а наименьшие зимние увеличились в 2,4 раза.

### ВЫВОДЫ

Анализ результатов наблюдений за гидрометеорологическим режимом болот севера и северо-запада России показал, что именно 1978–1980 гг. являются тем рубежом, с которого наблюдается уменьшение глубины промерзания и изменение характеристик стока с болот. За сравнимые отрезки времени (с 1963 по 2014 гг.) среднегодовая температура воздуха на северо-западном болоте (Ламмин-Суо) повысилась на 1,3 °С, на северном болоте (Иласское) – на 1,2 °С. При климатических изменениях (с 1981 по 2018 гг.) увеличение среднегодовой температуры залежи на болоте Ламмин-Суо составило 0,6 °С, на болоте Иласское – 0,8 °С, что вызвало уменьшение глубины промерзания торфяной залежи.

Установлено, что при изменении климатических характеристик количество выпавших атмосферных осадков, которые являются основной приходной составляющей стока с олиготрофных болот, возросло. В то же время, анализ динамики максимальных снегозапасов на болотах под воздействием оттепелей показывает устойчивый отрицательный тренд.

Средняя глубина промерзания на болоте Ламмин-Суо уменьшилась и составила 69 % от первоначальной величины, на Иласском болоте – 71 %. Такая динамика обуславливает уменьшение законсервированной влаги в мерзлом слое и увеличение влаги, участвующей в формировании зимнего стока с болот. Глубина промерзания является главным фактором, регулирующим соотношение зимнего и весеннего стока.

В зимний период сток с болот возможен только в том случае, если в деятельном слое залежи существует проточная зона. Анализ формирования проточной зоны однозначно показывает, что при изменении климата в сторону потепления проточная зона увеличивается. Увеличение проточной зоны влияет на увеличение зимнего стока и уменьшение весеннего. На болоте Ламмин-Суо сток за зимние месяцы возрос от первоначальной величины в 2,6 раза, наибольшие расходы весеннего половодья уменьшились в 1,5 раза, а наименьшие зимние увеличились в 2,4 раза. На Иласском болоте средняя величина зимних расходов возросла с 5,8 до 11,7 л/с.

Таким образом, при климатических изменениях на в значительной степени заболоченных территориях севера и северо-запада Российской Федерации заметно изменяется внутригодовое распределение стока и, в частности, зимней и весенней фаз гидрологического цикла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Современные и перспективные изменения стока рек России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата. СПб, 2007. С. 20–32.
2. Калюжный И.Л., Романюк К.Д. Изменения водного режима болот севера и северо-запада России под влиянием климатических факторов // Метеорология и гидрология. 2010. № 7. С. 85–98.
3. Лавров С.А., Калюжный И.Л. Физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек бассейна Волги в условиях изменения климата // Водное хозяйство России. 2012. № 4. С. 74–84.
4. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб: Изд-во Нестор-История, 2010. 162 с.
5. Калюжный И.Л., Батуев В.И. Формирование температурного режима торфяной залежи при изменении климатических характеристик в северной и северо-западной зоне олиготрофных болот ЕТР // Труды ГГО, 2015. Вып. 577. С. 156–168.
6. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 345 с.
7. Крестовский О.И., Сергеева А.Г. Роль испарения в формировании потерь весеннего стока на водосборах лесной зоны ЕТС // Труды ГГИ. 1977. Вып. 233. С. 79–86.
8. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Основные физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек в условиях потепления климата // Метеорология и гидрология. 2012. №1. С. 68–81.
9. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Глубина промерзания почвы и подпочвенных грунтов в бассейне р. Волга при климатических изменениях за последний тридцатилетний период и методике ее расчета // Инженерные изыскания. 2015. № 3. С. 52–59.
10. Калюжный И.Л., Лавров С.А., Романюк К.Д. Влияние климатических факторов на гидроэкологию болот севера и северо-запада России // Сборник работ по гидрологии. 2011. № 28. С. 106–127.
11. Романов В.В. Методы определения запаса воды в деятельном слое и расчеты элементов водного баланса выпуклых болот // Труды ГГИ, 1953. Вып. 39 (93). С. 96–115.

*Для цитирования:* Батуев В.И., Калюжный И.Л. Анализ факторов, определяющих многолетнее изменение стока с олиготрофных болот // Водное хозяйство России. 2020. № 6. С. 28–46.

**Сведения об авторах:**

**Батуев Владимир Иванович**, старший научный сотрудник, отдел прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальных исследований, ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (ГГИ), 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия Васильевского острова, д. 23; e-mail: batuevggi@mail.ru

**Калюжный Игорь Леонидович**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией гидрофизики, ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (ГГИ), 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия Васильевского острова, д. 23; e-mail: hfl@mail.ru

**ANALYSIS OF THE FACTORS DETERMINING MANY-YEAR CHANGES  
OF RUNOFF FROM OLIGOTROPHIC BOGS**

**Vladimir. I. Batuyev, Igor L. Kalyuzhniy**

*State Hydrological Institute, Saint Petersburg, Russia*

**Abstract:** The article presents results of the analysis of interaction of the factors determining the process of the winter and spring runoff formation on the basis of integrated hydro/meteorological observations at the Lammin-Suo (Leningrad Oblast) and Ilass (Archangel Oblast) oligotrophic bogs during the period of stabilization (1950-1980) and the period of climate change (1981-2018). We have stated that the freezing depth is a factor that regulates the ratio between the winter runoff and spring runoff. It has been shown that the layer of the winter runoff-forming moisture increase with its decrease and, consequently, the winter runoff is increasing while the spring runoff is decreasing.

Analysis of results of the observation over the hydrological regime of the bogs of the north and north-west of Russia has shown that it is exactly the 1978-1980 period that is the boundary, which the freeze depth decrease and the change of the characteristics of runoff from bogs can be observed.

**Key words:** oligotrophic bogs, climatic changes, losses of snow reserves, runoff-forming moisture, runoff.

**About the authors:**

Vladimir I. Batuyev, Senior Researcher, State Hydrological Institute Department of Forecasting of Hydrological Processes and Experimental Research, 2nd liniya Vasilyevskogo Ostrova, 23, St. Petersburg 199053, Russia; e-mail: batuevggi@mail.ru

Igor L. Kalyuzhniy, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory of Hydro/physics, State Hydrological Institute Department of Forecasting of Hydrological Processes and Experimental Research, 2nd liniya Vasilyevskogo Ostrova, 23, St. Petersburg 199053, Russia; e-mail: hfl@mail.ru

**For citation:** *Batuyev V.I., Kalyuzhniy I.L. Analysis of the Factors Determining Many-year Changes of Runoff from Oligotrophic Bogs // Water Sector of Russia. 2020. No. 6. P. 28–46.*

**REFERENCES**

1. *Shiklomanov I.A., Georgievsky V.Y. Sovremenniye i perspektivniye izmeneniya stoka rek Rossiya pod vliyaniyem klimaticheskikh faktorov [Modern and prospective changes in the flow of rivers in Russia under the influence of climatic factors] // Land water resources in a changing climate. SPb, 2007. Pp. 20–32.*
2. *Kalyuzhny I.L., Romanyuk K.D. Izmeneniya vodnogo rezhima bolot severa i severo-zapada Rossiya pod vliyaniyem klimaticheskikh faktorov [Changes in the water regime of bogs in the north and north-west of Russia under the influence of climatic factors] // Meteorology and Hydrology, 2010, No. 7. Pp. 85–98.*
3. *Lavrov S.A., Kalyuzhny I.L. Fizicheskiye protsessy i zakonomernosti formirovaniya zinego i vesennego stoka rek basseyna Volgi v usloviyakh izmeneniya klimata [Physical processes and patterns of the formation of winter and spring runoff of rivers in the Volga basin under climate change] // Water Sector of Russia. 2012. No. 4. Pp. 74–84.*
4. *Metodicheskiye rekomendatsiyi po otsenke odnorodnosti gidrologicheskikh kharakteristik i opredeleniyu ikh rashchtenykh znacheniy po neodnorodnym dannym [Methodological recommendations for assessing the homogeneity of hydrological characteristics and determining their calculated values by heterogeneous data]. SPb, 2010. Ed. Nestor-History. 162 p.*

5. *Kalyuzhny I.L., Batuev V.I.* Formirovaniye temperaturnogo rezhima torfyanoy zalezhi pri izmeneniyi klimaticheskikh kharakteristik v severnoy i severo-zapdanoy zone oligotropnykh bolot ETR [Formation of the temperature regime of peat deposits with changes in climatic characteristics in the northern and northwestern zones of oligotrophic bogs of the ETR] // Proceedings of the GGO, 2015. Iss. 577. Pp. 156–168.
6. *Kuzmin P.P.* Protsess tayaniya snezhnogo pokrova [The process of snow cover melting]. L.: Gidrometeoizdat, 1961. 345 p.
7. *Krestovsky O.I., Sergeeva A.G.* Rol ispareniya v formirovaniyi poter vesennego stoka na vodosborakh lesnoy zony UTS [The role of evaporation in the formation of losses of spring runoff in the catchments of the forest zone of the UTS] // Proceedings of the State Hydrological Institute, 1977. Iss. 233. Pp. 79–86.
8. *Kalyuzhny I.L., Lavrov S.A.* Osnovniye fizicheskiye prorsessy i zakonomernosti formirovaniya zimnego i vesennego stoka rek v usloviyakh potepleniya klimata [The main physical processes and patterns of the formation of winter and spring river runoff in conditions of climate warming] // Meteorology and Hydrology. 2012. No. 1. Pp. 68–81.
9. *Kalyuzhny I.L., Lavrov S.A.* Glubina promerzaniya pochvy i podpochvennykh gruntov v bassejne reki Volga pri klimaticheskikh izmeneniyakh za posledniy tridsatiletniy period i metodika eye rascheta [The depth of freezing of soil and subsoil in the basin of the Volga River under climatic changes over the last thirty years and the method of its calculation] // Engineering research. 2015. No. 3. Pp. 52–59.
10. *Kalyuzhny I.L., Lavrov S.A., Romanyuk K.D.* Vliyaniye klimaticheskikh faktorov na gidroekologiyu bolot na severe i severo-zapade Rossii [The influence of climatic factors on the hydroecology of bogs in the north and north-west of Russia] // Collection of works on hydrology. 2011. No. 28. Pp. 106–127.
11. *Romanov V.V.* Sposoby opredeleniya zapasov vody v deyatelnom sloye i raschet elementov vodnogo balansa vypuklykh bolot [Methods for determining the water reserve in the active layer and calculations of the elements of the water balance of convex bogs] // Proceedings of the State Hydrological Institute. 1953. Iss. 39 (93). Pp. 96–115.