

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И
ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH

УДК 556.048

DOI: 10.34753/HS.2021.3.1.87

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА
МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ
ОСНОВНЫХ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК НА ВАЛДАЕ

Е.В. Гуревич

Государственный гидрологический институт,
г. Санкт-Петербург, Россия
gewita@yandex.ru

ANALYSIS AND EVALUATION OF
LONG-TERM CHANGES IN THE
MAIN HYDROMETEOROLOGICAL
CHARACTERISTICS ON THE
VALDAI

Elena V. Gurevich

State hydrological Institute, Saint-Petersburg,
Russian Federation
gewita@yandex.ru

Аннотация. Актуальность темы обусловлена непрекращающимся интересом к региональным последствиям потепления климата и обновлением оценок многолетних изменений по удлиненным рядам гидрометеорологических наблюдений. Целью исследования являлся анализ многолетних изменений температуры воздуха, атмосферных осадков, максимальной глубины промерзания почвы, высоты снежного покрова, режима подземных вод и речного стока за общий период наблюдений 1939–2018 годы по материалам Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории.

В результате анализа набора данных метеорологических и гидрологических наблюдений, были даны оценки климатических изменений. Установлено повышение средней годовой температуры воздуха с 1988 года на 1,4°C с наиболее значительным ростом температуры воздуха в холодный период года в январе-феврале и в марте. Годовые суммы осадков выросли в среднем на 114 мм по сравнению с 1939–1979 годами, увеличение осадков произошло преимущественно в холодные месяцы года. Максимальная глубина промерзания почвы уменьшилась в среднем в 2 раза. При этом на исследованных малых водотоках (лог Таежный и река Полометь) средний годовой сток рек существенно не

Abstract. The relevance of the topic is due to the continuing interest in the regional consequences of climate warming and the updating of estimates of long-term changes in the extended series of hydrometeorological observations. The aim of the study was to analyze the long-term changes in air temperature, precipitation, the maximum depth of soil freezing, the height of snow cover, the regime of underground water and river flow for the total observation period of 1939–2018 based on the materials of the Valdai Research Hydrological Laboratory.

The average annual air temperature has increased by 1.4°C since 1988, with the most significant increase in air temperature in January-February and in March. Annual precipitation totals increased by an average of 114 mm compared to 1939–1979, the increase in precipitation occurred mainly in the colder months of the year. The maximum depth of soil freezing decreased by an average of 2 times. At the same time, on the studied small watercourses (the Taiga log and the river Polomet'). The average annual flow of rivers has not changed significantly. Multidirectional trends are observed in the long-term fluctuations of the maximum spring flow of rivers. Ground water levels did not increase in 1991–2016, and in some upper aquifers they decreased. The largest replenishment of groundwater reserves in the spring began to occur on average 2 weeks earlier. Over the past 30 years, the minimum 30-day winter water

изменился. В многолетних колебаниях максимального весеннего стока рек наблюдаются разнонаправленные тенденции. Уровни подземных вод в 1991–2016 годах не повышались, а в отдельных верхних водоносных слоях – понижались. Наибольшее пополнение запасов подземных вод весной стало происходить в среднем на 2 недели раньше. За последние 30 лет минимальные 30-суточные зимние расходы воды не росли, увеличилась вариация колебаний минимальных 30-суточных летне-осенних расходов воды рек.

Ключевые слова: температура воздуха; осадки; глубина промерзания; снежный покров; уровни подземных вод; расходы воды

Введение

Целью исследования являлся анализ многолетних колебаний основных гидрометеорологических характеристик за общий период наблюдений 1939–2018 годы по материалам наблюдений Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории. Актуальность темы обусловлена научным интересом к оценке последствий региональных изменений климата по удлиненным рядам наблюдений, так как подобные работы для изучаемой территории не выполнялись около тридцати лет.

Несмотря на многочисленные работы, включающие анализ долгосрочных изменений различных метеорологических и гидрологических показателей, данное исследование представляет особый интерес поскольку, в связи с сокращением сети наблюдений, ощущается нехватка натурных данных гидрометеорологического мониторинга для оценки местных последствий изменения климата, которые могут отличаться от региональных обобщений. А наиболее достоверно последствия климатических изменений могут быть оценены по данным инструментальных измерений, которые

consumption has not increased, and the variation of fluctuations in the minimum 30-day summer-autumn water consumption of rivers has increased.

Keywords: air temperature; precipitation; freezing depth; snow cover; underground water levels; water flow rates

проводятся на гидрометеорологической сети наблюдений.

Материалы и методы

Валдайская научно-исследовательская гидрологическая лаборатория осуществляет комплекс наблюдений за элементами водного баланса. По финансовым причинам программа наблюдений с 1990-х годов начала сокращаться, как и количество воднобалансовых станций. Поэтому в данной работе использованы данные гидрометеорологических наблюдений с наиболее длительными периодами.

Район исследования находится в центральной части Валдайской возвышенности.

В качестве исходной информации использованы следующие характеристики: средние месячные температура воздуха за 1939–2018 годы и осадки за 1955–2018 годы, максимальная высота снежного покрова за 1939–1941, 1950–2014, 2016–2018 годы по данным ландшафтных съемок в лесу и поле, глубина промерзания почвогрунтов за 1952–2017 годы, уровни подземных вод за 1953–2017 годы, расходы воды за 1949–2017 годы¹.

Объектами исследования являлись река Полометь у деревни Яжелбицы и лог Таежный.

¹ Материалы наблюдений Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории им. В.А. Урываева. Валдай, ВНИГЛ ГГИ, 1939–2018.

Лог Таежный впадает в озеро Валдайское. Площадь водосбора 0,45 км², средняя высота водосбора 210 м БС, средний уклон водосбора 85‰. Водосбор характеризуется мелкохолмистым рельефом. Водосбор лога почти полностью покрыт лесом.

Река Полометь вытекает из озера Русского и впадает в реку Полу в 111 км от ее устья. Площадь водосбора 631 км², средняя высота водосбора 200 м БС, средний уклон водосбора 29,1‰. Высота истока 188 м над уровнем моря. В верхнем течении река Полометь протекает по сильно облесённой местности, в нижнем течении – среди болот.

Наблюдения за стоком воды реки Поломети также выполняются ниже по течению у деревни Ермошкино (F=1 180 км²) и деревни Лычково (F=2 200 км²), но на указанных участках на водный режим реки оказывает влияние мелиоративная сеть, поэтому эти данные не были использованы в данном исследовании.

Оценка многолетних колебаний выполнена с помощью хронологических графиков, разностно-интегральных кривых и табличного анализа средних значений характеристик за выделенные периоды.

Результаты и обсуждения

Температура воздуха

На рассматриваемой территории средняя годовая температура воздуха в период наблюдений с 1939 по 2018 год составила 4,0°C. При этом самыми холодными годами остались наиболее ранние 1941 (0,6°C) и 1942 (1,4°C) годы, а наиболее теплыми стали поздние годы

наблюдений – 1989 и 2015 (6,2°C), 2014 годы (5,7°C).

В многолетних колебаниях средней годовой температуры воздуха отмечаются скачкообразное повышение с 1989 года (рисунок 1а) и перелом в 1987–1988 годах на разностно-интегральной кривой (рисунок 1б). Средняя годовая температура воздуха в период с 1988 по 2018 год стала выше на 1,4°C в сравнении с ранним периодом наблюдений с 1939 по 1987 год.

Рост средней годовой температуры воздуха обусловлен повышением температуры воздуха во все сезоны, но наиболее существенное потепление наблюдается в период с отрицательными температурами воздуха – с декабря по апрель (таблица 1). С 1988 года средняя температура воздуха за календарную зиму повысилась на 2,5°C; весенние температуры выросли в среднем на 1,8°C; осенние и летние – на 0,7°C и 1,0°C соответственно.

Зимы до 1988 года характеризовались большой амплитудой колебаний за многолетний период, более низкими температурными минимумами и менее частым повторением максимумов в отличие от последних трех десятилетий. За весь период наблюдений в данном районе самыми холодными остались зимы более раннего периода до 1988 года:

1941–1942 годов ($T_{ср. XII-II} = -15,7^\circ\text{C}$) и

1955–1956 годов ($T_{ср. XII-II} = -14,8^\circ\text{C}$).

Диапазоны колебаний средних за календарную зиму температур воздуха уменьшились с $-15,7^\circ\text{C} \dots -2,6^\circ\text{C}$ в период с 1939 по 1987 год до $-11,0^\circ\text{C} \dots -2,7^\circ\text{C}$ в период с 1988 по 2018 год.

Таблица 1. Средняя месячная температура воздуха за два периода (°C).

Table 1. Average monthly air temperature for two periods (°C).

Период	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1939–1987	–10,4	–9,3	–4,7	3,1	10,4	14,8	16,7	15,2	9,7	4,0	–1,8	–6,5
1988–2018	–6,9	–6,7	–2,1	4,8	11,4	15,5	18,1	16,0	10,7	4,7	–1,3	–5,1
изменение	3,5	2,6	2,6	1,7	1,0	0,7	1,4	0,8	1,0	0,7	0,4	1,4

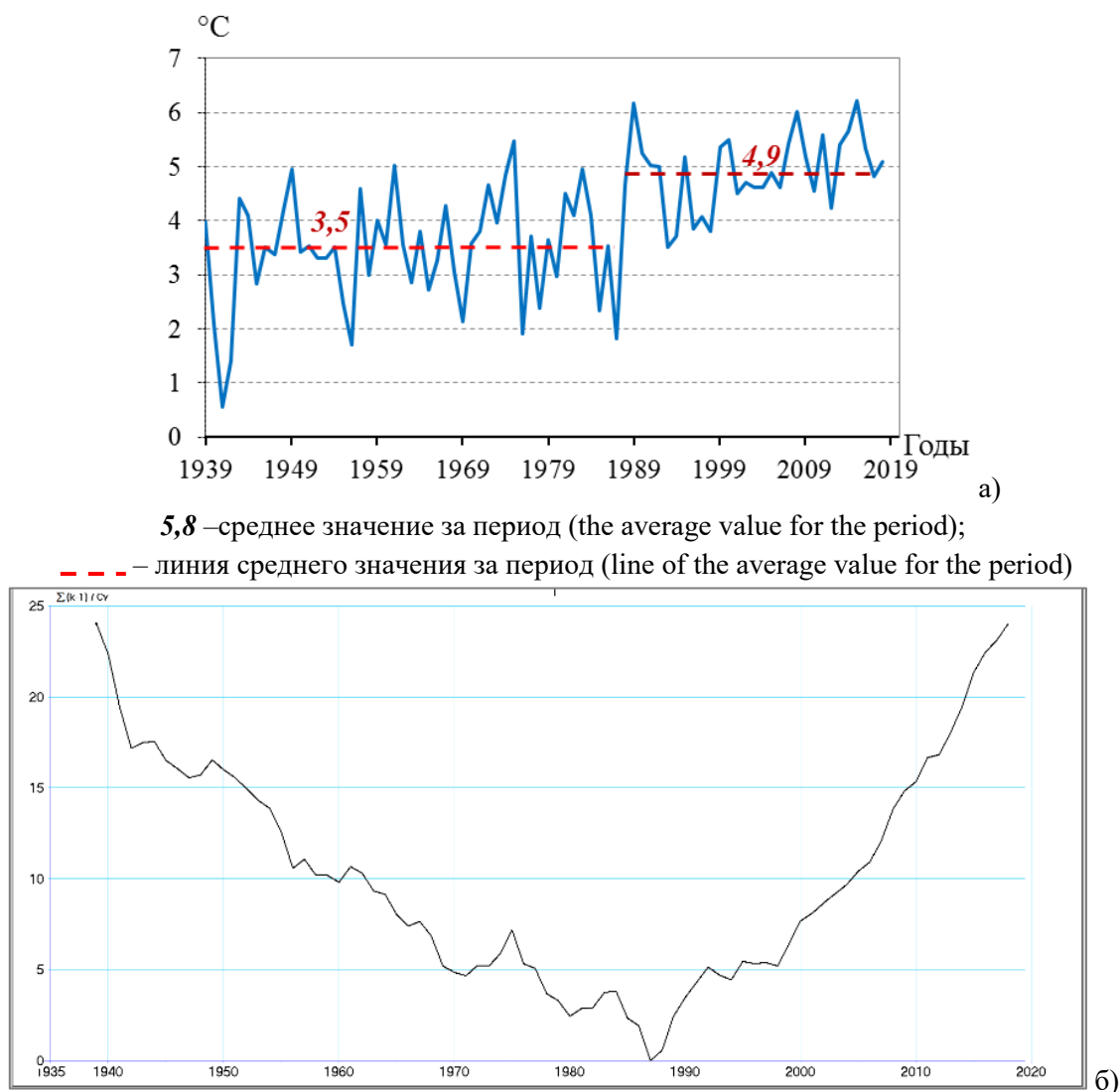


Рисунок 1. Многолетние изменения средней годовой температуры воздуха:

- а) многолетние изменения средней годовой температуры воздуха;
 б) разностно-интегральная кривая средней годовой температуры воздуха.

Figure 1. Long-term changes in the average annual air temperature:

- а) long-term changes in the average annual air temperature;
 б) the difference-integral curve of the average annual air temperature.

С 1988 года метеорологическая продолжительность зим сократилась за счет снижения суровости декабря и потепления марта. Температура воздуха за декабрь повысилась на $1,4^{\circ}\text{C}$, января на $3,5^{\circ}\text{C}$, февраля на $2,6^{\circ}\text{C}$ и межсезонного марта – на $2,6^{\circ}\text{C}$ (таблица 1). А в короткий период с 2003 по 2018 год средняя температура воздуха за декабрь составляла ($-3,5^{\circ}\text{C}$), то есть было еще теплее на 3°C относительно более раннего периода до 1988 года. Одновременно увеличилась метеорологическая продолжительность осеннего

сезона из-за потепления декабря, а также в декабре все чаще наблюдаются оттепели и дожди вместо снегопадов.

Обращает на себя внимание значительное повышение средней температуры воздуха января и выравнивание температурных условий января и февраля. По годовому температурному минимуму зима делится на два противоположенных по интенсивности криогенных процесса периода. Первая часть зимы (период похолодания) характеризуется интенсивным нарастанием сумм отрицательных температур воздуха, а во вторую

часть зимы (период потепления) происходит снижение темпов нарастания сумм отрицательных температур воздуха (рисунок 2). Поэтому наибольшее криогенное воздействие на реки и их водосборы в холодные зимы обычно происходило в первую часть календарной зимы. Так, «наибольшая интенсивность нарастания толщины льда наблюдается в первый месяц ледостава, по средним многолетним данным 1–2 см/сут. В отдельные зимы на реках европейской части СССР она достигает 3,0–3,5 см/сут, а на реках азиатской части – 2,5–3,7

см/сут. В последующие месяцы ледостава на большинстве рек интенсивность нарастания льда уменьшается» [Доненко, 1987]. Повышение годового температурного минимума января и его приравнивание к температурным условиям февраля подтверждает то, что наблюдаемое уменьшение интенсивности криогенных процессов происходит не только в связи с потеплением зим в целом, но и в результате существенного снижения интенсивности нарастания отрицательных температур воздуха в первую часть зимы.

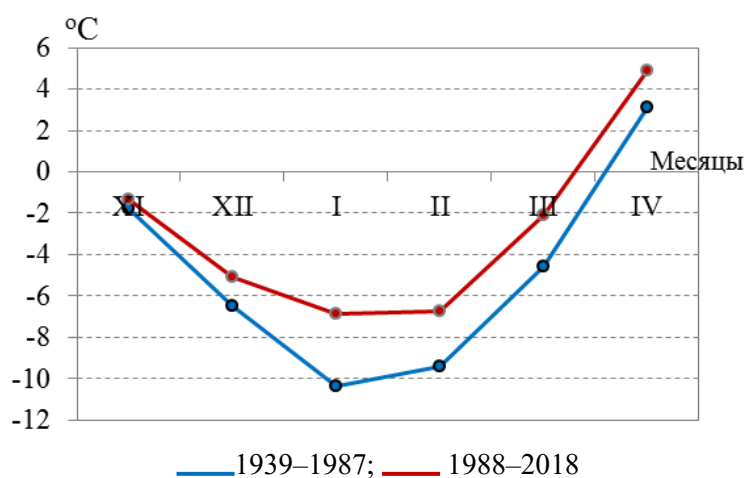


Рисунок 2. Изменение средней месячной температуры воздуха за два периода.

Figure 2. Changes in the average monthly air temperature over two periods.

Многолетнее потепление началось с весенних периодов (рисунок 3). Весной 1966 года отмечается первое с 1948 года превышение температурного максимума и затем каждое десятилетие происходит неравномерное повышение средних за сезон температур воздуха (рисунок 3б). Увеличилась повторяемость ранних сроков наступления метеорологической весны. Так, например, до 1988 года фиксировали только 1 случай положительной средней температуры воздуха за март (0,4°C в 1967 году). В период с 1989 по 2017 год наблюдали уже 8 таких случаев (в 1989, 1990, 1992, 1995, 2002, 2007, 2014, 2017 годах) в диапазоне от 0° до +3,7°C. Следует отметить, что на Валдае в первый весенний месяц часто наблюдается наибольшая глубина промерзания почвогрунтов, которая в последние годы существенно уменьшилась.

В летние и осенние месяцы температуры воздуха повысились меньше, чем в другие месяцы

года, несмотря на то что в период с 1988 по 2018 год наблюдались исторические максимумы и «рекорд» 18,6°C в 1989 году. За последние 20 лет диапазон колебаний июльской температуры воздуха увеличивался дважды: в 2001 (21,2°C) и в 2010 (исторический максимум 24,1°C) годах. До этого самый теплый июль был в 1972 году (20,7°C).

В осенний сезон произошло наименьшее повышение температуры воздуха, которое составило в среднем 0,7°C за последние тридцать лет. Самой теплой была осень 1974 года с температурой 6,5°C. За весь период наблюдений зафиксирован один случай с отрицательной средней месячной температурой воздуха (в октябре 1976 года –1,4°C). С 1958 года увеличилась частота повторений положительной месячной температурой воздуха за ноябрь, но не выше 0,5°C. До этого было только 2 таких случая: в 1940 (0,3°C) и в 1949 (0°C) годах. А с 1967 года

средняя за ноябрь температура воздуха впервые от начала наблюдений поднялась до $1,2^{\circ}\text{C}$ и в период с 1967 по 2013 год отмечено 13 случаев с ноябрьской температурой воздуха выше или

равной 1°C . Таким образом, в межсезонный ноябрь в последние десятилетия наблюдается увеличение доли положительных температур воздуха.

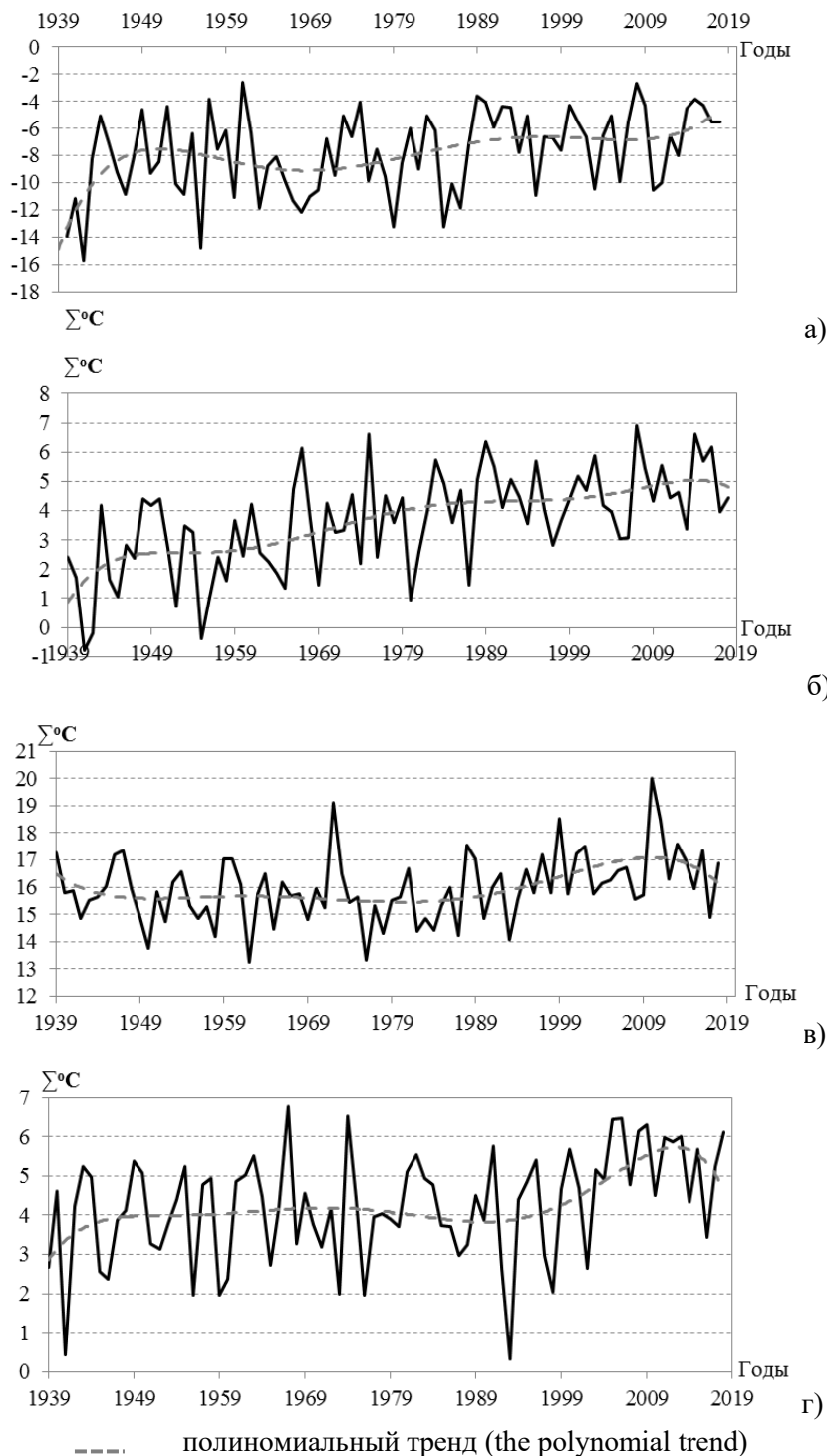


Рисунок 3. Многолетние изменения суммы температуры воздуха по сезонам:

а) зима (декабрь – февраль); б) весна (март – май); в) лето (июнь – июль); г) осень (сентябрь – ноябрь)

Figure 3. Long-term changes in the sum of air temperature by season: а) winter (December – February);

б) spring (March – May); в) summer (June – July); г) autumn (September – November).

Атмосферные осадки

За период с 1955 по 2018 год на рассматриваемой территории выпадало в среднем 730 мм осадков в год. Основное количество атмосферных осадков (68% от годовой суммы) выпадает в виде дождей в период апрель – октябрь. Сумма осадков за отдельные годы различается почти вдвое. Так, наименьшая годовая величина осадков 476 мм наблюдалась в 1941 году, а наибольшая – 1 016 мм в 2004 году.

Анализ динамики многолетних колебаний годовых сумм осадков показывает их неравномерный рост (рисунок 4а) и переломную точку, которая приходится на 1979 год (рисунок 4б).

На фоне значительных межгодовых колебаний выявляются изменения внутригодового распределения величины осадков за разные периоды – до и после 1980-х годов. С учетом границы между фазами увлажнения, определенной по разностно-интегральной кривой, выполнена оценка изменений месячных и годовых сумм осадков (таблица 2). Наибольший рост годовых сумм осадков происходил в период с 1979 по 2018 год, когда средняя многолетняя сумма осадков увеличилась на 114 мм – с 675 мм до 798 мм. Максимальные значения годового количества осадков увеличились с 891 мм (1953 год) до 1016 мм (2004 год), минимальные – с 476 мм (1941 год) до 590 мм (1996 год).

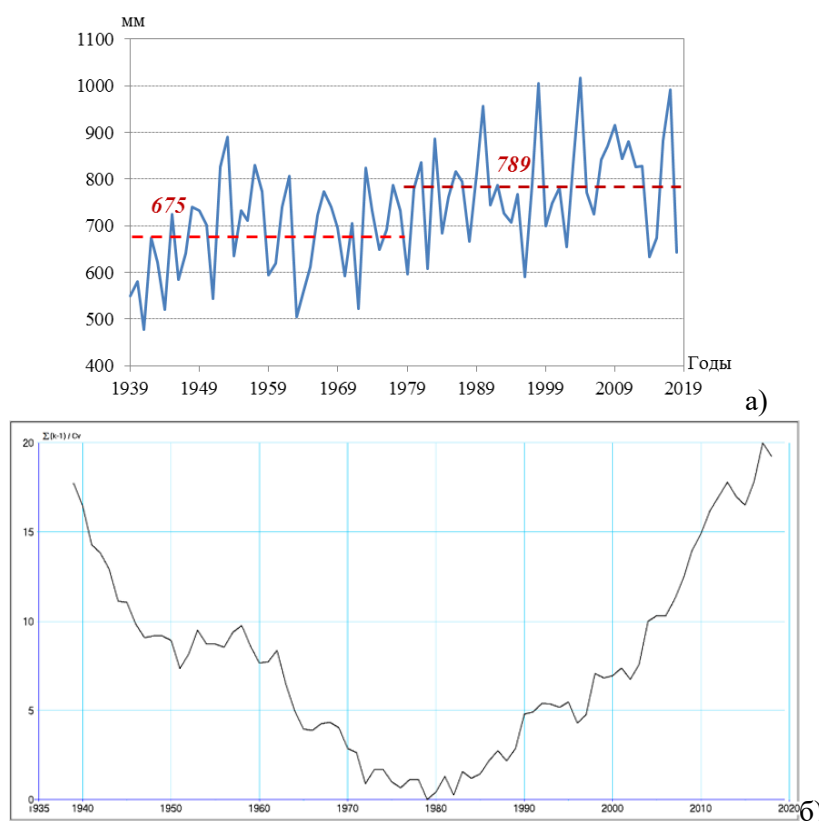


Рисунок 4. Многолетние изменения годовых сумм осадков:

а) хронологический график; б) разностно-интегральная кривая.

Figure 4. Long-term changes in annual precipitation totals:

а) chronological graph; б) difference-integral curve.

Таблица 2. Средние месячные и годовые суммы осадков за два периода (мм).

Table 2. Average monthly and annual precipitation totals for two periods (mm).

Период	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1955–1979	34	30	34	44	52	83	87	72	74	71	52	42	675
1980–2018	63	41	42	41	59	83	89	95	68	76	67	65	789
изменение	29	11	8	–2	6	0	2	23	–6	6	15	23	114

Сравнительный анализ средних величин месячных сумм осадков за ранний период с 1955 по 1979 год и поздний период с 1980 по 2018 год показывает, что рост количества осадков произошел во все месяцы года, кроме апреля, июня и сентября (таблица 2). В апреле и сентябре отмечаются небольшие отрицательные разности. Наибольший рост наблюдается зимой с повышенным вкладом в эту величину осадков января – на 29 мм. В весенний сезон осадки незначительно увеличились в марте – на 8 мм и мае – на 6 мм. Существенный рост осадков на 23 мм наблюдается в августе. Снижение среднего многолетнего количества осадков за период с 1980 по 2018 год в сентябре на 6 мм «компенсировалось» ростом на эту же величину осадков октября. Наибольший вклад в суммарный рост осадков за осенние сезоны внес ноябрь увеличением на 15 мм.

Таким образом, во внутригодовом распределении атмосферных осадков в период после 1979 года наблюдается увеличение осадков в холодную часть года с наибольшим вкладом осадков за декабрь–январь и рост осадков за август.

В зимние месяцы отмечается увеличение частоты повторений повышенных величин месячных сумм осадков, которые в ряде случаев превышают ранее наблюдавшиеся. Если до 1979 года суммы осадков за декабрь наблюдались величиной до 85,4 мм, то в период с 1980 по 2018 год отмечено 4 случая превышения этой величины (в 1980, 1983, 2015 годах и исторический максимум 110,2 мм в 1999 году). Изменения январских сумм осадков до 1979 года происходили до величины 69,1 мм, а с 1980 года наблюдали уже 14 случаев превышения этой величины (в 1983, 1990–1993, 1997, 1999, 2005, 2009, 2011, 2015, 2016, 2018 годах и исторический максимум 137,7 мм в 2007 году).

Из летних месяцев август выделяется большой многолетней амплитудой колебаний в период с 1980 по 2018 год, когда наблюдали 3 максимума месячных сумм осадков – в 1980, 1989 (исторический максимум 223,8 мм) и 2010 годах, и исторический минимум в 2002 году (4,8 мм). До

1979 года историческим максимумом была величина 136,7 мм в августе 1961 года.

Особенности изменения внутригодового распределения месячных сумм осадков с 1980-х годов имеют не только количественные, но и временные признаки. Летние максимумы стали чаще наблюдаться не в июле, а в августе. Осенние максимумы сдвинулись с сентября на октябрь. Наибольшее за зиму количество осадков раньше выпадало обычно в декабре, а в последние десятилетия количество осадков за январь приблизилось к величине декабрьских осадков. Среднее за период с 1980 по 2018 год внутрисезонное распределение осадков в весенний сезон осталось почти без изменений.

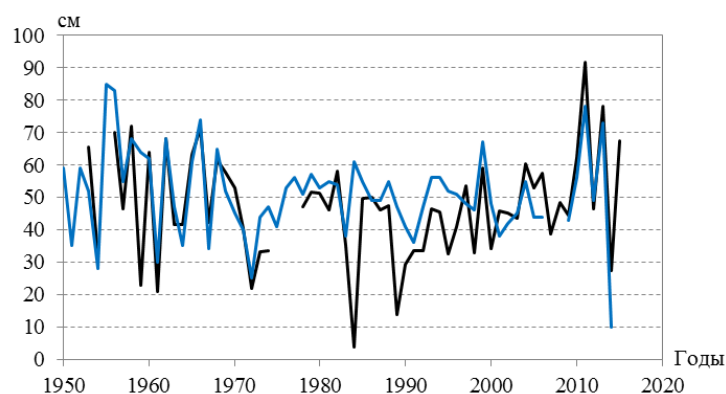
Снежный покров

Появление устойчивого снежного покрова обычно приходится на середину ноября, сход снега происходит в первых числах апреля. Снежный покров может сходить на месяц раньше или позже средней даты. В 1941 году имел место случай, когда снег выпал 3 июня, образовавшийся снежный покров высотой 2 см пролежал целые сутки. Средний период с устойчивым снежным покровом составляет около 140 дней.

Снегомерные съемки выполняются в условиях леса, поля, луга и заболоченных участков и у мерзлотометров.

За общий период наблюдений на разных участках 1939–1941, 1950–2014, 2016–2017 годы средняя многолетняя наибольшая высота снежного покрова к концу зимы находилась в интервалах 48–57 см в лесу, 50–67 см на полевых и заболоченных участках.

Максимальная высота снега 95 см измерена на полевом участке водосбора реки Поломети у деревни Крестовая 02.04.2013 и 83 см на лесных участках: на логе Таежном (12.04.1955) и на реке Поломети у деревни Крестовая (28.03.2011). Низкие величины снегозапасов наблюдали зимой 2014 года, когда на полевом участке водосбора реки Поломети у деревни Дворец отмечена наибольшая за зиму высота снежного покрова 13 см, на лесном участке – 1 см (13.03.2014).



— на водосборе лога Таежного (on the catchment area of the Taiga log);
 — у мерзлотометров №№9–14 (at permafrost meters No. 9–14)

Рисунок 5. Средняя высота снежного покрова к концу зимы.

Figure 5. Average snow cover height by the end of winter.

Анализ данных показал общую согласованность многолетних изменений на логе Таежном и на наблюдательных площадках у мерзлотометров, но с некоторыми отличиями в отдельные годы (рисунок 5), связанную с погодными и ландшафтными особенностями формирования снеготопливых запасов. Ранний период наблюдений до 1972 года характеризуется более частой повторяемостью многоснежных зим с повышенными высотой снежного покрова к концу зим: 25–98 см на логе Таежном и 22–72 см на участках у мерзлотометров. В период с 1973 по 2010 год изменения происходили в диапазоне пониженных величин – 36–67 см на логе Таежном и 4–59 см у мерзлотометров. А в короткий период с 2011 по 2014 год наблюдались как максимумы 2011 года, так и минимумы 2014 года. Как видно по рисунку 5, несмотря на общее соответствие многолетних колебаний на разных наблюдательных площадках, на участках у

мерзлотометров наблюдается направленная тенденция снижения снеготопливых запасов до 1991 года и затем фаза роста, а на водосборе лога Таежного фаза пониженных значений проходит в виде бестрендовой «полочки».

Средняя плотность снега составляет 0,24–0,27 г/см³. Минимальные значения 0,15 г/см³ наблюдали 03.03.1954 на заболоченном участке лога Таежного. Самая высокая плотность снега 0,36 г/см³ отмечена 13.03.2014 на поле у деревни Дворец. Характер многолетних колебаний показывает рост плотности снега с середины 1970-х годов прошлого века. С зимы 2003–2004 годов наблюдаются отрицательные тенденции в связи с участвовавшими оттепелями.

С 1988 года наблюдается смещение сроков максимального снеготопливого накопления в среднем на 2 недели раньше – с третьей декады на первую декаду марта, а в отдельные зимы и на более ранние даты (рисунок 6).

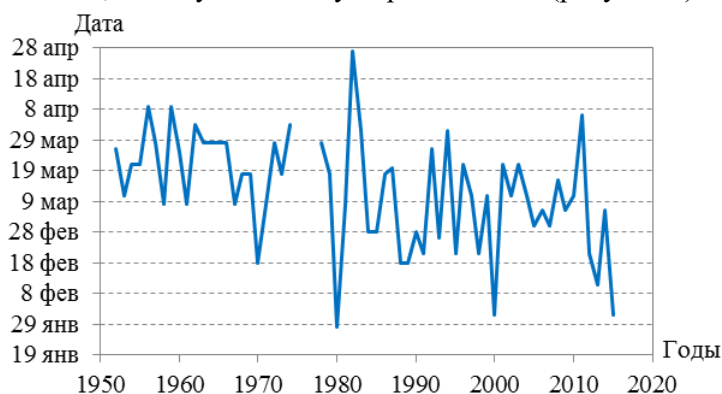


Рисунок 6. Многолетние изменения дат максимальной высоты снежного покрова у мерзлотометров.

Figure 6. Long-term changes in the dates of the maximum snow cover height for permafrost meters.

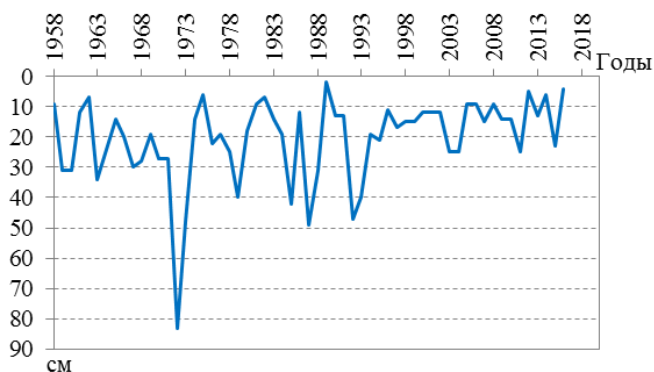


Рисунок 7. Многолетние изменения максимальной глубины промерзания почвы на логе Таежном (мерзлотомер №10).

Figure 7. Long-term changes in the maximum depth of soil freezing in the Taiga tax (permafrost meter №10).

Промерзание почвогрунтов

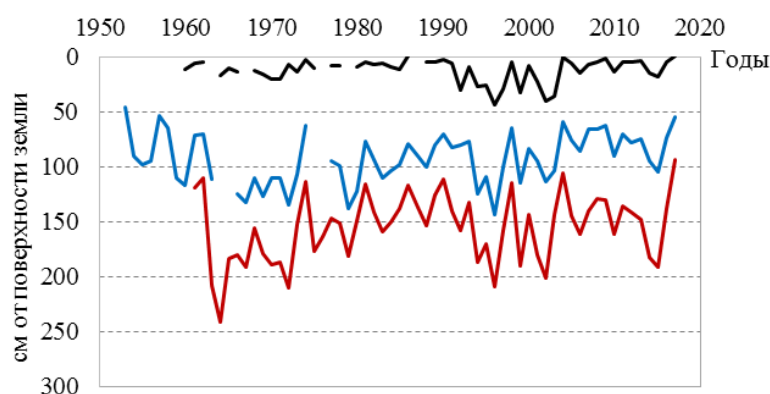
Средняя максимальная глубина промерзания почвы по данным мерзлотометров, установленных на наблюдательных площадках лога Таежного, за период с 1952 по 2017 год составляет 8–33 см. Самой низкой средней многолетней промерзаемостью отличаются уголья с еловым древостоем на болоте с торфом – 8–12 см (мерзлотометры №8 и №9). Максимальная глубина промерзания чаще наблюдается на верхних и средних участках склонов с еловым древостоем, сложенных супесью и суглинками. Наибольшее промерзание почвы зафиксировано в 1972 году, когда почва к концу зимы промерзла до 98 см (мерзлотомер № 6). Этот год был не только один из самых холодных по температуре воздуха, но и по продолжительности морозного периода. В период с января по апрель 1972 года среднемесячная температура составила: январь ($-20,1^{\circ}\text{C}$); февраль ($-11,1^{\circ}\text{C}$); март ($-9,4^{\circ}\text{C}$); апрель ($-0,8^{\circ}\text{C}$). Абсолютные минимумы температуры воздуха были в январе ($-34,0^{\circ}\text{C}$); феврале ($-21,2^{\circ}\text{C}$); марте ($-25,5^{\circ}\text{C}$); апреле ($-5,5^{\circ}\text{C}$). Кроме того, зимой 1971–1972 годов

максимальный снегозапас составил только 53 мм при норме 127 мм.

Как видно из рисунка 7, максимальная глубина промерзания почвы за последние 25 лет уменьшилась. Наиболее существенное снижение отмечается с 1994 года. За период с 1953 по 1993 год средняя максимальная глубина промерзания составляла 24 см, в период с 1994 по 2018 год – 15 см.

Режим подземных вод

Для анализа режима подземных вод были выбраны скважины с наиболее длительным и непрерывным периодом наблюдений. Скважины расположены в средней части водосбора лога Таежный и характеризуют режим подземных вод на глубинах 1,3–5 м. На рисунке 8 приведены многолетние изменения средних годовых уровней подземных вод в скважинах 12, 16 и 18н, которые показывают интенсивное повышение до 1990 года с последующей замедлением скорости роста, что согласуется с динамикой колебаний годовых осадков. В целом этот рост связан с увеличением годовых осадков на Валдае (рисунки 4а и 9), обуславливающих запасы подземных вод.



— скважина 18н (borehole 18n); — скважина 12 (borehole 12); — скважина 16 (borehole 16)

Рисунок 8. Многолетние изменения средних годовых уровней подземных воды в скважинах на логе Таежном.

Figure 8. Long-term changes in the average annual levels of underground water in wells in the Taiga basin.

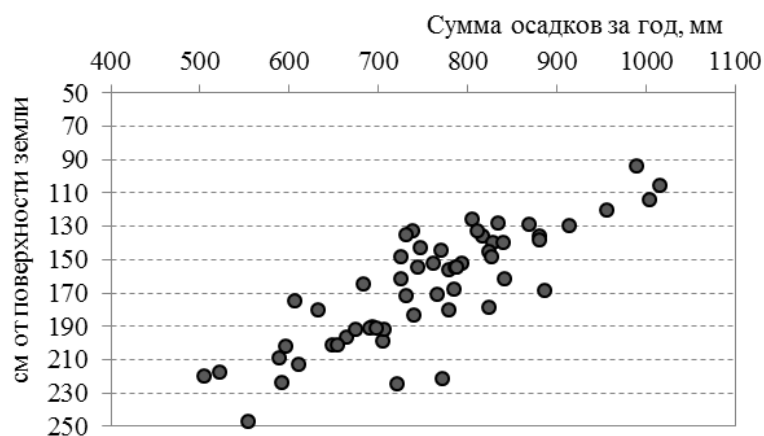
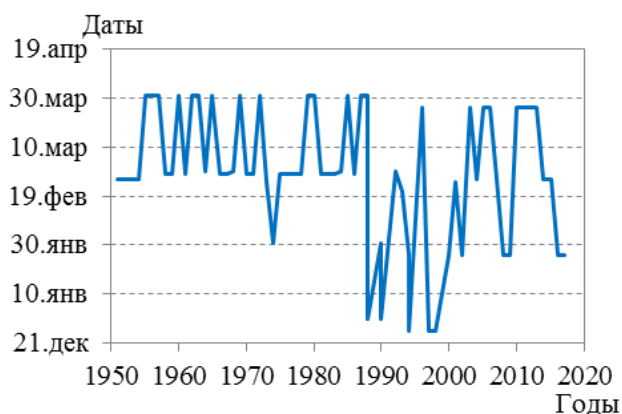
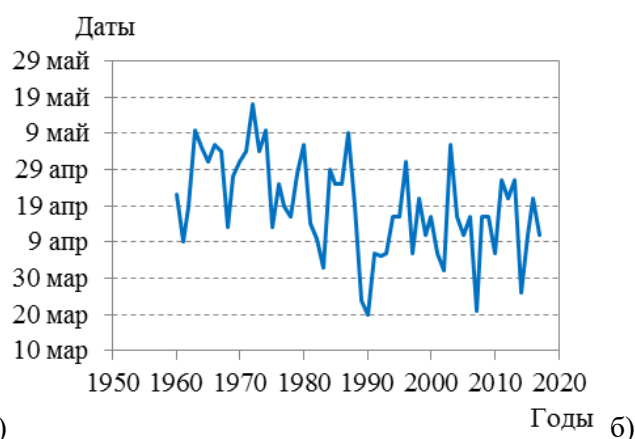


Рисунок 9. Связь средних годовых уровней подземных вод (скв.18н) с суммой осадков за год.

Figure 9. Relationship of average annual groundwater levels (borehole 18h) with the amount of precipitation for the year.



а)



б)

Рисунок 10. Многолетние изменения дат низших зимне-весенних (а) и высших весенних (б) уровней подземных вод (скв.12 и скв.18н).

Figure 10. Long-term changes in the dates of the lower winter-spring (a) and higher spring (b) groundwater levels (borehole 12 and borehole 18h).

Анализ дат низших зимне-весенних уровней подземных вод в скважинах 12 и 18н позволил выделить три периода (рисунок 10а): с 1950 по 1987, с 1988 по 2002 и с 2003 по 2017 год. В период с 1950 по 1987 год самые низкие в году уровни наблюдались в короткий интервал: 26 февраля – 31 марта (за исключением 1974 года – 31 января). В период с 1988 по 2002 год произошел сдвиг годовых минимумов на 1 месяц раньше – на последнюю декаду декабря: 26 декабря – 26 февраля (26 марта в 1996 году), что согласуется с переломом в 1988 году в многолетних колебаниях средних годовых температур воздуха (рисунок 1а). В период с 2003 по 2017 год отмечено увеличение временного интервала на 1 месяц: 26 января – 26 марта. Таким образом, можно сделать вывод об изменении сроков наибольшей сработки уровней подземных вод перед началом весеннего половодья с 1988 года.

Наибольшее пополнение запасов подземных вод весной стало происходить раньше

в среднем на 2 недели. Если в 70–х годах прошлого столетия это наблюдалось в последних числах апреля, то в последние тридцать лет – в середине апреля (рисунок 10б).

Межсезонная сдвигка сначала зимне-весенних сроков окончания криогенных явлений, так как весенние периоды стали теплеть раньше, а затем и осенне-зимних сроков начала этих явлений сократила их продолжительность. Сокращение продолжительности и снижение интенсивности криогенных процессов отразилось на изменении внутрисезонного распределения уровней подземных вод. В холодные и продолжительные зимние сезоны снижение уровней подземных вод обычно начиналось в конце ноября–начале декабря и продолжалось до марта по довольно плавной кривой истощения (рисунок 11а), а в мягкие зимы длительность падения уровней короче или снижения уровней может не наблюдаться (рисунок 11б). В таблице 3 указаны средние месячные температуры воздуха рассматриваемых сезонов.

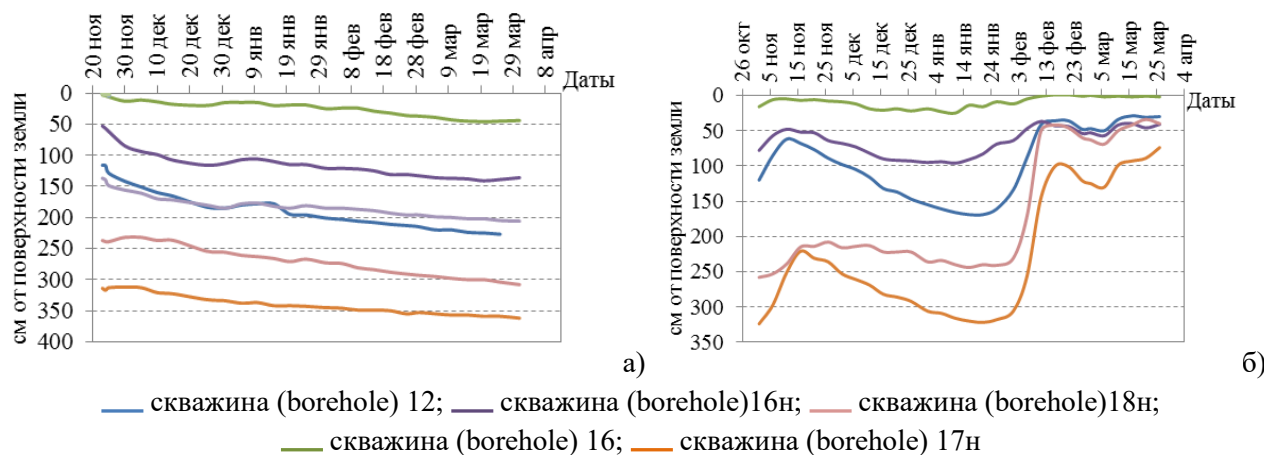


Рисунок 11. Гидрографы уровней подземных вод в холодные зимы:
а) сезон 1963–1964 б) сезон 1999–2000.

Figure 11. Hydrographs of groundwater levels in cold winters:
а) 1963–1964 season; б) 1999–2000 season.

Таблица 3. Средняя месячная температура воздуха (°C).

Table 3. Average monthly air temperature (°C).

Годы	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
1963–1964	–0,8	–8,6	–7,3	–10,4	–7,5
1999–2000	–3,2	–2,3	–6,6	–4,1	–1,9

Снижение уровней подземных вод в холодный сезон длилось 127 дней (23.11.1963 – 31.03.1964), а в мягкий сезон – 47 дней (26.12.1999 – 11.02.2000). Таким образом, продолжительность сработки подземных вод в мягкий сезон короче на 80 дней чем в холодный сезон. Приведенный пример показывает, что потепление зим оказывает серьезное влияние на внутрисезонное распределение уровней подземных вод.

Роль отрицательной температуры воздуха в зимнем режиме подземных вод подтверждается графиком связи на рисунке 12, характеризующим повышение уровней подземных вод при потеплении зимних сезонов. Таким образом, на повышение уровней подземных вод (рисунок 9) влияли как рост осадков (рисунок 4 и таблица 2), так и потепление холодного периода года (таблица 1 и рисунок 2).

С 1980 года произошло изменение характера связи между водоносными слоями, прорезающими скважины 12 и 16 (рисунок 13). Как видно, после 1980 года чаще происходила более глубокая сработка (понижение) уровней грунтовых вод в скважине 16, чем в ранний период с 1950 по 1980 год, и уровни опускались в среднем на 50–60 см ниже, несмотря на многолетний рост годовых сумм осадков.

Несмотря на увеличение приходной части в виде повышения годового количества осадков и доли тало-дождевой составляющей в питании подземных вод, в период с 1991 по 2016 год не наблюдалось многолетнего роста уровней подземных вод (рисунок 8). Из этого можно сделать вывод о том, что в подземном водосборе лог Таежный происходили не однонаправленные процессы под влиянием одних и тех же внешних метеофакторов. Данные обстоятельства указывают на изменение условий питания разных водоносных слоев в последние десятилетия и на более сложный механизм реакции подземного водосбора на климатические изменения. Взаимосвязь между изменяющимися климатическими переменными и подземными водами является более сложной и плохо изученной [Ковалевский, 2007; Kumar, 2012]. К сожалению, с 1993 года на Валдайской воднобалансовой станции были прекращены наблюдения за запасами влаги в почвогрунтах и впоследствии сокращена программа наблюдений за уровнями подземных вод в связи с уменьшением финансирования, что затрудняет выявление причинно-следственных связей, приведших к разнонаправленным многолетним тенденциям. Исследования по данной теме будут продолжены.



Рисунок 12. Связь средних месячных уровней подземных вод в феврале (скв.18н) со средней температурой воздуха за декабрь–февраль.

Figure 12. Relationship of average monthly groundwater levels in February (borehole 18h) with an average air temperature for December–February.

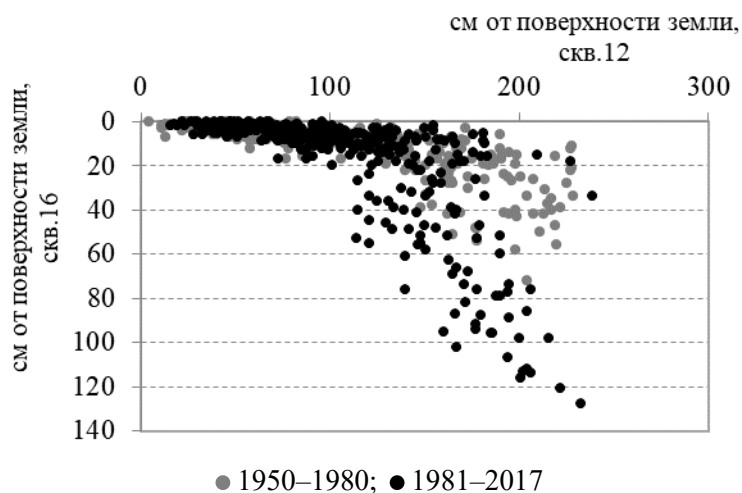


Рисунок 13. Изменение характера связи средних месячных уровней грунтовых вод в скважинах 12 и 16 за два периода.

Figure 13. Changes in the relationship between the average monthly groundwater levels in borehole 12 and borehole 16 over two periods.

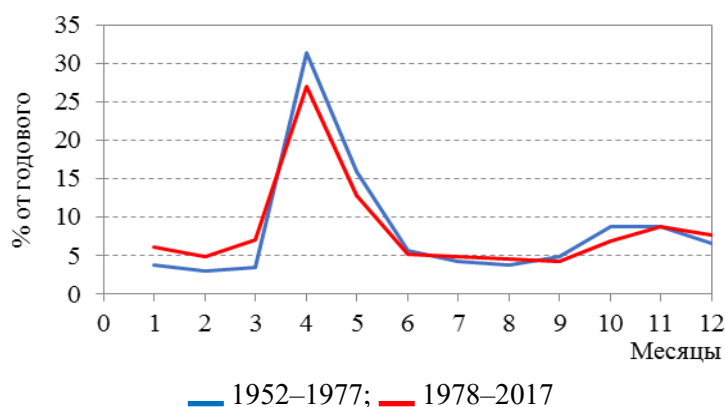


Рисунок 14. Осредненный по месяцам гидрограф стока реки Полометь (деревня Яжелбицы) для двух периодов.

Figure 14. Monthly average flow hydrograph of the Polomet River – Yazhelbitsy settlement for two periods.

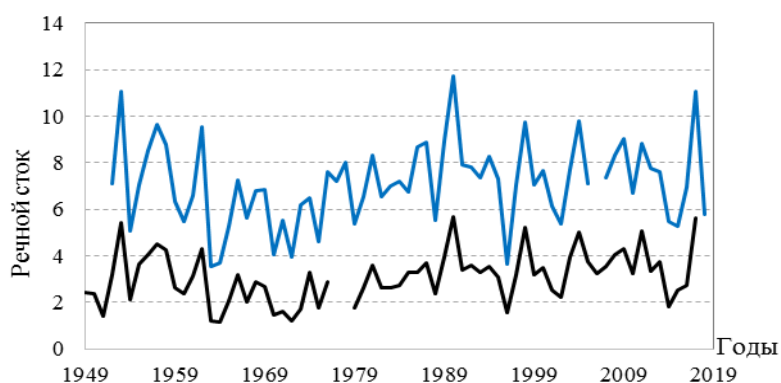
Водотоки

Анализ многолетних колебаний стока воды выполнен для двух водотоков с наиболее длительными и без перерывов данными наблюдений за стоком воды: река Полометь – деревня Яжелбицы с площадью водосбора 631 км² и лог Таежный с площадью водосбора 0,45 км².

Конфигурация годового гидрографа на малых реках в целом сохранилась (рисунок 14). Наибольший объем стока по-прежнему формируется в период прохождения основной фазы весеннего половодья в апреле, хотя его доля в процентах от годового стока снизилась в

среднем на 5%. При этом необходимо отметить более раннее начало половодья и увеличение его продолжительности.

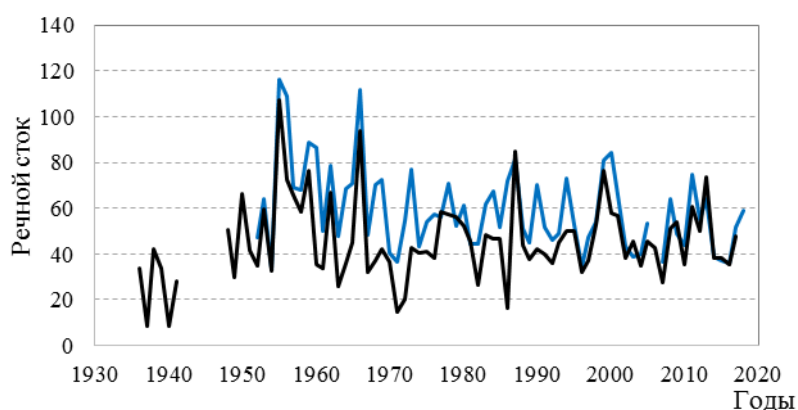
Ход многолетних колебаний средних годовых расходов воды показывает, что, несмотря на рост осадков в последние десятилетия, годовой сток рек изменился несущественно (рисунок 15). Наибольшие значения наблюдали в 1953, 1990 (исторический максимум) и 2017 годах. Самый низкий годовой сток наблюдали на реке Полометь в 1963 (3,56 м³/с) и 1996 (3,63 м³/с) годах, а на лог Таежном – в 1964 (1,13 л/с) и 1972 (1,19 л/с) годах. Как видно, расходы воды в маловодные годы были близки по величине.



— река Полометь (деревня Яжелбицы) (river Polomet – Yazhelbitsy settlement) $F=631 \text{ км}^2 (\text{м}^3/\text{с})$;
 — лог Таежный (log Taiga) $F=0,45 \text{ км}^2 (\text{л}/\text{с})$;

Рисунок 15. Средний годовой речной сток.

Figure 15. Average annual river flow.



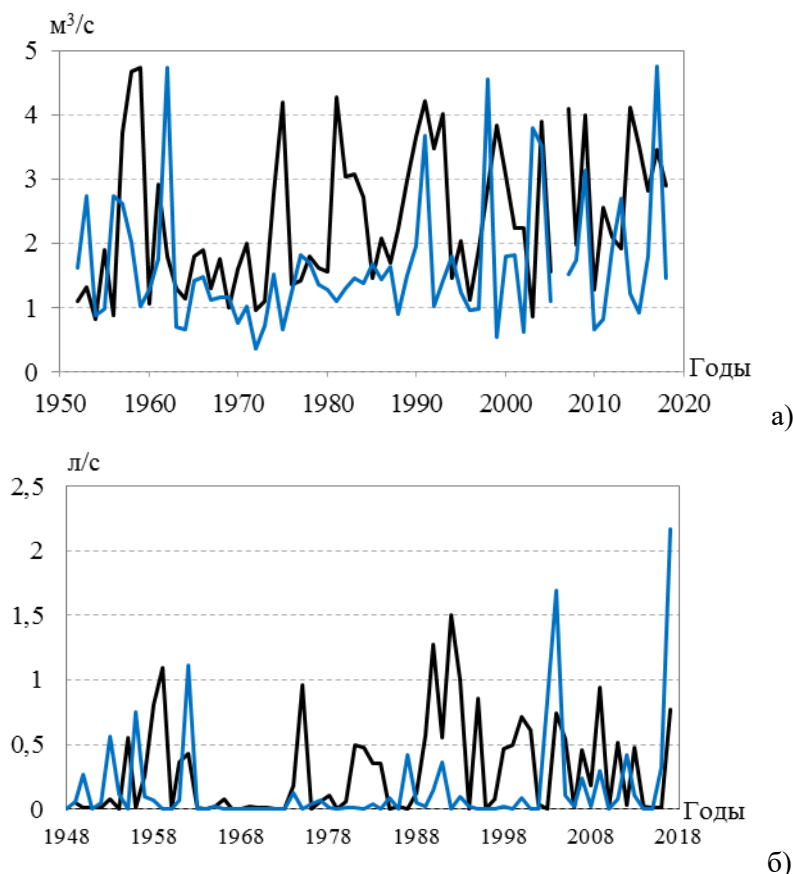
— река Полометь (деревня Яжелбицы) (river Polomet – Yazhelbitsy settlement) $F=631 \text{ км}^2 (\text{м}^3/\text{с})$;
 — лог Таежный (log Taiga) $F=0,45 \text{ км}^2 (\text{л}/\text{с})$;

Рисунок 16. Максимальные расходы воды весеннего половодья.

Figure 16. Maximum spring flood water consumption.

Максимальные расходы воды весеннего половодья неравномерно снижались с 1956 года. Согласно ранним наблюдениям в логе Таежном, в 1937 и 1940 годах были измерены самые низкие наибольшие расходы воды половодья – 8,65 л/с (рисунок 16). Максимальные расходы воды весенних половодий 1955 и 1966 годов на реке Полометь (деревня Яжелбицы) и в логе Таежном остались не превышенными до настоящего времени. Ход многолетних изменений максимального весеннего стока показывает, что после 1966 года расходы воды реки Полометь

неравномерно снижались, а по логу Таежному, наоборот, тенденция снижения отсутствует, хотя колебания синхронны. Наиболее вероятной основной причиной данного обстоятельства являются разные объемы снегонакопления на водосборах из-за неоднородности подстилающих поверхностей. Наличие отличий в многолетних тенденциях на разных наблюдательных площадках, несмотря на общую согласованность в многолетних колебаниях, подтверждается рисунком 5.



— зимний сток (winter runoff); — летне-осенний сток (summer-autumn runoff);

Рисунок 17. Минимальный 30-суточный сток:

а) река Полометь (деревня Яжелбицы) $F=631 \text{ км}^2$ ($\text{м}^3/\text{с}$); б) лог Таежный $F=0,45 \text{ км}^2$ (л/с)

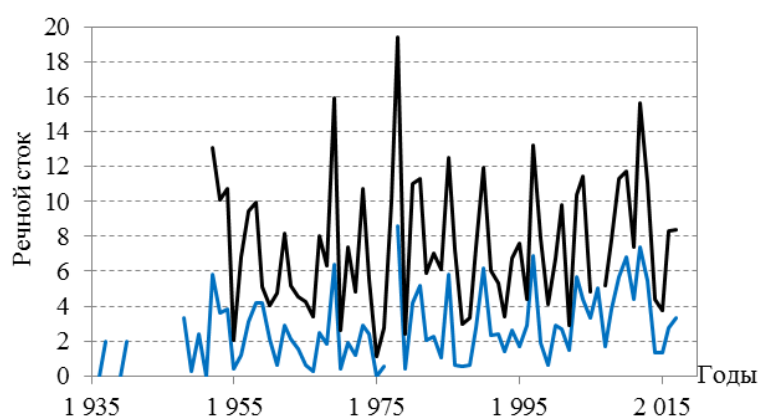
Figure 17. Minimum 30-day runoff:

а) river Polomet (Yazhelbitsy settlement) (m^3/s); б) log Taiga (l/s)

В период с 1952 по 2018 год многолетние изменения минимального 30-суточного зимнего стока реки Полометь находились в диапазоне величин раннего периода (с 1954 по 1959 год), а в период с 1994 по 2005 год наблюдалась фаза спада (рисунок 17а). Наибольшие значения 1957 и 1958 годов остались не превышенными в поздний период, а минимум 2003 года ($0,86 \text{ м}^3/\text{с}$) был близок к расходам воды 1954 ($0,83 \text{ м}^3/\text{с}$) и 1956 ($0,89 \text{ м}^3/\text{с}$) годов. Ход многолетних колебаний минимальных зимних расходов воды в логе Таежном показывает увеличение повторяемости высокой межени с 1990 года и даже превышение раннего максимума 1959 года минимальными 30-суточными расходами воды 1990 и 1992 годов, но с 1994 года интенсивный рост сменился разворотом тренда (рисунок 17б). Наиболее активный рост зимнего меженного стока рек происходил в период с 1974 по 1993 год, что

согласуется с интенсивным ростом годовых сумм осадков в этот период (рисунок 4а). В целом можно отметить, что за последние 30 лет минимальные 30-суточные зимние расходы воды не росли.

Предзимнее увлажнение территории участвует в формировании минимального зимнего стока. Однако следует отметить отсутствие корреляции не только между минимальным 30-суточным стоком и средними месячными расходами воды в ноябре, но и между месячными расходами воды ноября и декабря. Это указывает на сложный механизм формирования минимального зимнего стока рек на данной территории. Многолетние колебания средних месячных расходов воды на исследуемых реках показывают рост предзимней водности рек без выраженных фаз спадов и подъемов (рисунок 18).



— река Полометь (деревня Яжелбицы) (river Polomet – Yazhelbitsy settlement) $F=631 \text{ км}^2 (\text{м}^3/\text{с})$;
 — лог Таежный (log Taiga) $F=0,45 \text{ км}^2 (\text{л/с})$;

Рисунок 18. Средние месячные расходы воды за ноябрь.

Figure 18. Average monthly water consumption for November.

Характеры многолетних колебаний минимального 30-суточного летне-осеннего стока отличаются на сравниваемых водотоках. На реке Полометь – деревня Яжелбицы за период наблюдений расходы воды изменялись в диапазоне величин $0,36\text{--}4,73 \text{ м}^3/\text{с}$ с периода 1962–1972 годов до 2017 года, когда был на $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$ превышен исторический максимум 1962 года (рисунок 17а), период с 1963 по 1990 год характеризуется пониженными расходами. В логе Таежном наблюдается обратная картина: минимальный 30-суточный летне-осенний сток воды с 1963 года был ниже относительно раннего периода с 1950 по 1962 год, за исключением одиночных максимумов 2004 и 2017 годов (рисунок 17б), обусловленных выпадением большого количества осадков. С 1980 года сезонные осадки существенно не выросли за апрель – июль и сентябрь – октябрь (таблица 2), поэтому мы не видим роста минимального стока рек в летне-осеннюю межень за исключением двух локальных максимумов в логе Таежном, хотя в последние десятилетия на реке Полометь наблюдалось увеличение частоты прохождения повышенных расходов воды.

Анализ многолетних изменений гидрологических условий на двух водотоках разного размера, находящихся под влиянием одних и тех же погодных условий, показал отличия в формировании минимального зимнего и летне-осеннего стока. Сложные комбинации

процессов, влияющих на питание и разгрузку подземных вод [Куделин, 1966; Earman, 2011], а также недостаточное количество дополнительных натурных данных пока позволяют лишь констатировать наличие различий и изменений и дать обобщенную характеристику причин. В дальнейшем планируется проведение более подробных исследований для изучения сезонной динамики взаимодействия поверхностных и подземных вод в районе Валдая для оценки последствий климатических изменений для рек.

Выводы

В результате проведенной работы отмечены следующие тенденции:

- средняя годовая температура воздуха повысилась с 1988 года на $1,4^\circ\text{C}$, наиболее значительный рост температуры воздуха произошел в январе – феврале и в марте, многолетнее потепление сезонов началось с весенних периодов;

- годовые суммы осадков выросли в среднем на 114 мм по сравнению с периодом с 1939 по 1979 год, увеличение осадков произошло преимущественно в холодные месяцы года;

- максимальная глубина промерзания почвы за последние 30 лет уменьшилась в среднем в 2 раза;

- средний годовой сток рек существенно не изменился;

– в ходе многолетних изменений максимальных расходов воды весеннего половодья на исследованных водотоках наблюдаются разнонаправленные тенденции;

– уровни подземных вод в период с 1991 по 2016 год не повышались, а в отдельных верхних водоносных слоях – понижались; наибольшее пополнение запасов подземных вод весной стало происходить в среднем на 2 недели раньше;

– за последние 30 лет минимальные 30-суточные зимние расходы воды не росли и

увеличилась вариация колебаний минимальных 30-суточных летне-осенних расходов воды.

Благодарности

Автор выражает благодарность директору Валдайского филиала ФГБУ «ГТИ» Маруничу А.С. и ведущему инженера Бабиню Т.И. за предоставленную информацию, а также всех сотрудников за многолетние наблюдения, необходимые для анализа влияния изменений климата на водный режим территории.

Литература

Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 246 с.

Ковалевский В.С. Влияние изменений климата на подземные воды // Водные ресурсы. 2007. Том 34. №2. С. 158–170.

Подземный сток на территории СССР / Под ред. Б.И. Куделина. М.: МГУ, 1966. 303 с.

Earman S., Dettinger M.D. Potential impacts of climate change on groundwater resources – a global review // *Journal of Water and Climate Change*. 2011. Vol. 2. Iss. 4. P. 213–229. DOI: [10.2166/wcc.2011.034](https://doi.org/10.2166/wcc.2011.034).

Kumar C.P. Climate change and its impact on groundwater resources // *Research inventory: International Journal of Engineering and Science*. 2012. Vol. 1. Iss. 5. P. 43–60.

References

Donchenko R.V. *Ledovyi rezhim rek SSSR [Ice regime of the USSR rivers]*. Leningrad, Publ. Hidrometeoizdat, 1987. 246 p. (In Russian; abstract in English).

Earman S., Dettinger M.D. Potential impacts of climate change on groundwater resources – a global review. *Journal of Water and Climate Change*, 2011, vol. 2, iss. 4, pp. 213–229. DOI: [10.2166/wcc.2011.034](https://doi.org/10.2166/wcc.2011.034).

Kovalevskii V.S. Effect of climate changes on groundwater. *Water Resources*, 2007, vol. 34, no. 2, pp. 140–152. DOI: [10.1134/S0097807807020042](https://doi.org/10.1134/S0097807807020042). (In Russ. ed.: Kovalevskii V.S. Vliyanie izmenenii klimata na podzemnye vody. *Vodnye resursy*, 2007, vol. 34, no. 2, pp. 158–170).

Kumar C.P. Climate change and its impact on groundwater resources. *Research inventory: International Journal of Engineering and Science*, 2012, vol. 1, iss. 5, pp. 43–60.

Podzemnyi stok na territorii SSSR [Underground runoff on the territory of the USSR]. Editor B.I. Kudelin. Moscow, Publ. of MSU, 1966. 303 p. (In Russian).