

УДК 556.047
DOI: 10.7868/S25000640200106

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕКИ ОБЬ

© 2020 г. А.С. Булавина¹

Аннотация. Изучена связь изменений годового и сезонного стока р. Обь в нижнем течении с основными климатическими характеристиками: температурой воздуха и осадками. Для изучения характеристик климата и их влияния на речной сток водосборный бассейн был рассмотрен по частям. Выделены 4 речных подбассейна системы Оби: Тобола, Ишима, Иртыша, Верхней и Средней Оби. Выполнен анализ значимости корреляций объемов речного стока в нижнем течении Оби с количеством осадков и температурой воздуха на территориях подбассейнов. Определены особенности влияния характеристик климата участков водосбора Оби на объем стока в нижнем течении реки.

Водность года определяется в первую очередь водностью теплого полугодия. Сток реки в теплое полугодие формируется в основном за счет снега, накопленного на водосборе в зимний период, и жидких осадков теплой половины года. Определены зоны наибольшего влияния твердых осадков на сток Нижней Оби в теплое полугодие. Наиболее значимо количество твердых осадков, выпадающих в бассейнах Тобола и Верхней и Средней Оби. Значительная часть экстремально многоводных для Оби лет может быть объяснена совпадением максимумов твердых осадков в этих бассейнах.

В холодное полугодие твердые осадки, выпавшие на водосбор, не участвуют в формировании стока. На территориях всех рассмотренных речных бассейнов отмечен рост количества зимних оттепелей, которые приводят к частичному таянию снега в холодное полугодие и повышению водности зим.

В целом сток Оби в теплое полугодие имеет более тесную связь с характеристиками климата, чем сток холодного полугодия.

Ключевые слова: речной сток, река Обь, водный режим, водосборный бассейн, колебания климатических характеристик.

CLIMATIC FACTORS OF THE OB RIVER RUNOFF FORMATION

A.S. Bulavina¹

Abstract. The correlation between the changes of the annual and seasonal Ob River runoff and the main climatic characteristics is considered. To study the climate characteristics and their impact on the river runoff the catchment area was divided into 4 separate river basins of the Ob River system: Tobol, Ishim, Irtysh, upper and middle Ob. An analysis of the significance of correlations of the Ob River runoff volumes with the amount of precipitation and temperatures in the territories of the partial basins is performed. The features of the influence of climate characteristics of the Ob catchment area parts on the runoff in the lower flow of the river are determined.

It is proved that the water content of a year is determined primarily by the water content of the warm half-year. River runoff in the warm half of the year is formed mainly by snow accumulated in the catchment area in winter, and liquid precipitation during the warm half-year. Local zones of influence of solid precipitation on the lower Ob River runoff during the warm half-year were determined. The most significant influence for the runoff during the warm half-year is the amount of solid precipitation in the Tobol and upper and middle Ob basins. A significant part of the years of extremely high water content for the Ob River can be explained by the coincidence of the maximum solid precipitation in these basins.

¹ Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17, e-mail: bulavina@mmbi.info

In the cold half-year, solid precipitation that falls into the catchment area do not participate in the formation of the runoff. An increase in the number of winter thaws was observed in the area of all the river basins. It was contributed to partial snow melting in the cold half-year and led to an increase in the winter water content.

In general, the Ob River runoff during the warm half of the year has a closer relationship with climate characteristics than the runoff during the cold half of the year.

Keywords: river runoff, Ob River, water regime, catchment area, climate fluctuations.

ВВЕДЕНИЕ

Изменение стока рек под влиянием изменений климата является одним из ключевых вопросов в гидрологии уже долгое время по ряду причин. Во-первых, это важность рек как источника пресной воды для нужд населения и хозяйства. Во-вторых, роль рек как транспортных артерий. В-третьих, влияние речного стока на гидрологический режим морей и процессы в морских экосистемах. Актуальность последнего продолжает возрастать по мере накопления данных комплексных морских исследований.

Обь – одна из крупнейших рек Арктического бассейна. Более 30 % поступающей в Карское море пресной воды обеспечивается ее стоком. Колебания стока Оби могут оказать существенное влияние на режим солености моря, а по некоторым оценкам, и на циркуляцию воды во всем Арктическом бассейне [1].

Для сибирских рек основным источником питания являются атмосферные осадки, и изменение их количества на водосборном бассейне вызывает изменения речного стока. Количество осадков на водосборе Оби в XX веке имело слабую тенденцию к увеличению [2]. Авторы вышеупомянутой работы отмечают, что, хотя статистическая значимость тренда не подтверждается, долгосрочные изменения количества осадков на водосборе Оби имеют направленный характер. Несмотря на некоторое увеличение количества осадков на водосборе, сток Оби в XX веке не имел тенденции к увеличению.

Изменения характеристик климата в различных частях больших по площади речных водосборов могут иметь разнонаправленный характер. Водосборный бассейн Оби является одним из крупнейших в мире. Это затрудняет выявление значимых трендов осадков и температуры воздуха, а также корреляций между объемом речного стока и этими параметрами для водосбора в целом.

Цель работы состоит в исследовании влияния колебаний климата отдельных участков водосборного бассейна Оби на объем стока реки в нижнем тече-

нии. Дробный анализ климата водосбора позволит выявить зоны преобладающего влияния различных метеорологических параметров на сток Оби.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Водосбор реки имеет большую протяженность с севера на юг и большую площадь, что обуславливает разнообразие условий формирования стока. При этом более 80 % стока Оби формируется выше места слияния ее с Иртышом (данные гидрологического поста (г/п) Обь – с. Белогорье). В нижнем течении Обь питается небольшими притоками, наиболее крупным из которых является р. Северная Сосьва со средним годовым стоком около 23 км³, что составляет менее 5 % от стока Оби. Исходя из этого, в работе принято, что закономерности колебаний стока Оби определяются в первую очередь взаимодействием и наложением колебаний климата на водосборах крупных притоков реки, расположенных выше слияния Оби и Иртыша.

Климатические условия водосбора разнообразны, осложнены неоднородностью особенностей рельефа. Для оценки характеристик климата внутри рассматриваемого водосбора были выделены 4 подбассейна: Иртыш (за исключением водосборных бассейнов Тобола и Ишима), Тобол, Ишим, водосбор Верхней и Средней Оби.

Для анализа характеристик климата были использованы данные метеорологических наблюдений на метеостанциях, расположенных на территориях подбассейнов. Характеристики водосборных подбассейнов и обеспеченность метеостанциями показаны в таблице 1.

Из электронной базы Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (г. Обнинск, Россия) [3; 4] были отобраны данные о среднем месячном количестве жидких и твердых атмосферных осадков и ежедневные данные о температуре воздуха на метеостанциях за период с 1936 по 2015 г.

Для каждого подбассейна рассчитаны месячные и годовые температуры воздуха и количество осад-

ков: за гидрологический год (с ноября по октябрь), в теплое (с мая по октябрь) и холодное (с ноября по апрель) полугодия. Малая обеспеченность территории данными метеонаблюдений создает необходимость широких пространственных интерполяций. По результатам исследования С.В. Крюковой и Т.Е. Симакиной [5], при интерполяции метеорологических данных наилучшим образом себя показал метод естественной окрестности (полигонов Тиссена). Он и был использован в качестве расчетного для получения средних характеристик климата речных подбассейнов.

Данные о средних годовых (с 1930 по 2015 г.) и месячных расходах воды (с 1930 по 1999 г.) получены из открытой электронной базы данных «A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region» [6].

Ряды стока Оби нельзя считать абсолютно однородными, поскольку в бассейне реки в течение рассматриваемого периода были построены ГЭС, что могло ослабить связь стока с климатическими параметрами. Однако, как было показано Д.В. Магрицким [7], регулирование стока в верхнем течении Оби и Иртыша не вызвало существенных изменений стока Нижней Оби.

Таблица 1. Обеспеченность водосборных подбассейнов Оби метеостанциями
Table 1. Provision of the catchment sub-basins of the Ob River with weather stations

| Бассейн Basin | Площадь, тыс. км ² / Area, thousand km ² | Количество метеостанций / Number of weather stations |
|---|---|---|
| Иртыш / Irtysh | 1646 | 11 |
| Тобол / Tobol | 426 | 8 |
| Ишим / Ishim | 177 | 6 |
| Верхняя и Средняя Обь / Upper and Middle Ob | 1047 | 12 |

Для анализа многолетних колебаний речного стока в нижнем течении Оби использован метод построения разностно-интегральных кривых (РИК) для определения фаз водности и пятилетних скользящих средних, для выявления тенденций изменения характеристик климата и речного стока.

Был выполнен анализ сопряженности объемов речного стока с количеством осадков и температурой воздуха на территориях подбассейнов, определены особенности влияния характеристик климата подбассейнов на объем стока в нижнем течении реки.

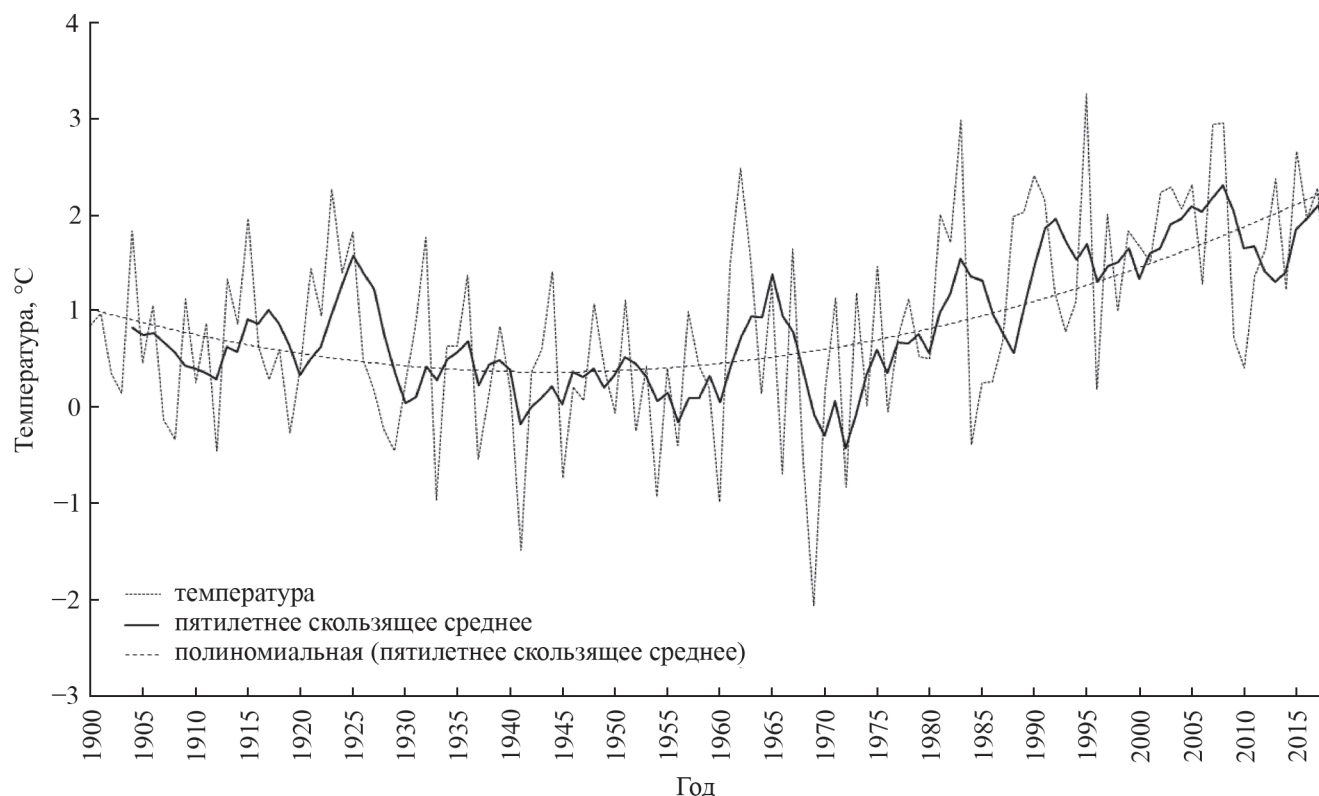


Рис. 1. Средняя годовая температура на водосборе р. Обь и ее пятилетнее скользящее среднее.
Fig. 1. Annual average temperature at the Ob River catchment area and its 5-year moving average.

Таблица 2. Многоводные и маловодные годы на р. Обь (г/п Салехард)
Table 2. High-water and low-water years for the Ob River (Salekhard hydrometric gauge station)

| Многоводные годы High-water years | Экстремально многоводные годы / Extremely high-water years | Маловодные годы Low-water years | Экстремально маловодные годы / Extremely low-water years |
|---|--|--|--|
| 1945, 1948, 1949, 1956, 1958, 1959, 1965, 1969, 1974, 1984, 1985, 1992, 1996, 2008 | 1940, 1946, 1947, 1970, 1972, 1978, 1998, 2003 | 1931–1933, 1936, 1939, 1944, 1951–1954, 1962, 1963, 1967, 1975, 1976, 1987, 1988, 1991, 2000, 2001, 2011, 2012 | 1966, 1981, 2014 |

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сток Нижней Оби и колебания климатических характеристик водосбора. В период с 1936 по 2015 г. направленных статистически значимых изменений годового стока Оби в замыкающем створе (гидрологический пост Обь – Салехард) не произошло. Отмечается слабая тенденция к его снижению. Количество осадков на водосборе Оби в этот период имело слабую тенденцию к увеличению. Колебания средних годовых расходов воды в створе г/п Салехард соотносятся с колебаниями средних по водосбору годовых сумм осадков в пределах статистически значимой корреляции на 5%-м уровне.

Среднее годовое количество осадков на территориях подбассейнов также не претерпело значимых изменений. В пределах водосборов Ишима, Иртыша и Тобола отмечены слабые положительные тренды годовых сумм осадков, на водосборе Верхней и Средней Оби – отрицательные, однако они статистически не значимы.

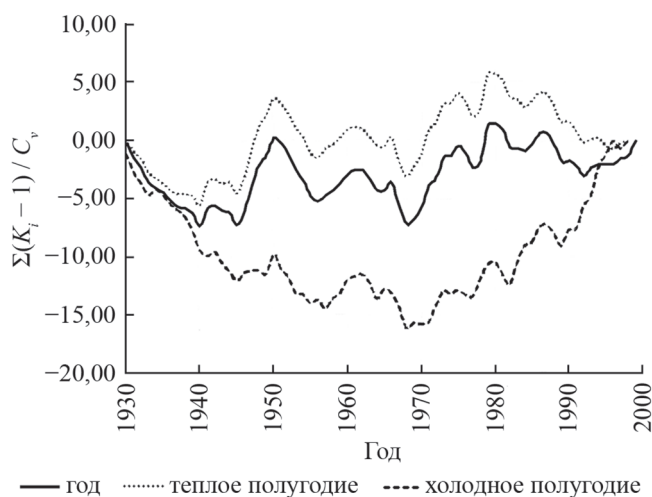


Рис. 2. Разностные интегральные кривые расходов воды в створе г/п Салехард.

Fig. 2. Residual mass curve of water discharge at the Salekhard hydrometric gauge station.

Причиной разнонаправленных тенденций изменения стока и количества осадков может быть начавшееся в 70-х гг. XX века повышение температуры воздуха на территории водосбора, увеличивающее затраты влаги на испарение. В работе В.И. Корзуна с соавторами [8] отмечалось, что на водосборе Оби на испарение расходуется 74 % выпадающих осадков. Таким образом, небольшое увеличение количества осадков может быть полностью нивелировано испарением при увеличении температуры воздуха над водосбором. За период с 1970 по 2015 г. средняя годовая температура воздуха над водосбором росла на 0,3 °C (рис. 1).

По формуле Чегодаева была рассчитана обеспеченность среднегодовых расходов воды в створе г/п Салехард и определены периоды повышенной и пониженной водности р. Обь (табл. 2).

Для выявления периодов водности теплого и холодного полугодий были построены разностные интегральные кривые для полугодических интервалов (рис. 2).

Для теплого полугодия можно выделить два полных цикла водности продолжительностью 23 года каждый (1945–1968 и 1969–1992), а также маловодную и многоводную фазы двух других циклов, не вошедших целиком (1930–1944 и 1993–1999).

В холодное полугодие наблюдения охватывают полный цикл водности либо его большую часть. Период 1930–1968 гг. соответствует его маловодной фазе, а 1969–1999 гг. – многоводной фазе. Увеличение водности реки в холодное полугодие может быть связано с более поздним наступлением холодов, зимними оттепелями и увеличением количества жидких осадков в холодное полугодие.

Наступление холодов определяет даты наступления ледовых явлений на реках. Начиная с 50-х гг. XX века отмечается сдвиг дат ледостава на более поздние сроки, а половодья – на более ранние [9]. Это не может не сказываться на временном распределении речного стока.

Таблица 3. Количество зимних дней с положительной температурой воздуха на метеостанциях водосборного бассейна Оби
Table 3. Number of winter days with positive air temperature at the weather stations of the Ob catchment area

| Метеостанция Weather station | Среднее годовое количество зимних дней с положительной температурой воздуха Average annual number of winter days with positive air temperature | | | | | | |
|------------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1941–1950 | 1951–1960 | 1961–1970 | 1971–1980 | 1981–1990 | 1991–2000 | 2001–2010 |
| Александровское Aleksandrovskoe | 0,9 | 2 | 1,5 | 1,7 | 2,9 | 2,3 | 2,6 |
| Барнаул Barnaul | – | – | 4,4 | 4,8 | 6,2 | 6,3 | 6,3 |
| Бийск Biysk | 5,6 | 6,3 | 7,1 | 9,3 | 8,9 | 10 | 10,1 |
| Ишим Ishim | 1,6 | 2,9 | 3,7 | 3,7 | 3,5 | 6,1 | 5,6 |
| Курган Kurgan | 2,4 | 3,3 | 4,4 | 4,3 | 4,7 | 6,2 | 6,8 |
| Омск Omsk | 1,6 | 3 | 3,3 | 3,4 | 3,4 | 4,5 | 5,9 |
| Салехард Salekhard | 1,1 | 0,9 | 0,8 | 1 | 1,3 | 1,2 | 1,5 |
| Тобольск Tobol'sk | 2,3 | 2,2 | 2,3 | 2,5 | 3,6 | 4,8 | 4,8 |
| Томск Tomsk | 2 | 2,5 | 3,4 | 3,3 | 3,6 | 3,5 | 3,8 |
| Ханты-Мансийск Khanty-Mansiysk | 1 | 4,2 | 1,1 | 2,2 | 2,7 | 2,3 | 2,7 |

Были рассчитаны среднее количество жидких осадков в холодное полугодие и их доля от общего количества осадков в холодное полугодие на территориях рассматриваемых подбассейнов за период многоводных зим (с 1969 по 1999 г.). Направленных изменений количества всех видов осадков и доли жидких осадков в холодное полугодие в исследуемых подбассейнах в этот период не происходило.

Увеличение стока в холодный период года может быть связано с частичным таянием снега в зимний период. Рост количества зимних дней, в которые максимальная температура в районе метеостанций достигала 0 °С и выше, свидетельствует об увеличении общей продолжительности зимних оттепелей во всех выделенных подбассейнах (табл. 3).

Частичное таяние снега увеличивает зимние расходы воды и несколько снижает сток за теплое полугодие. Однако снижения стока за теплое полугодие с наступлением периода многоводных зим не произошло. Вклад меженных расходов воды в общий годовой сток Оби составляет 13–16 %. Поэтому зимнее увеличение расходов воды может быть существенным для стока холодного полуго-

дия и сказаться на водности этого периода года, но оставаться незамеченным при изучении водности теплое полугодия. По этой же причине водность для всего года определяется в первую очередь стоком за теплое полугодия (май – октябрь).

Сток Оби и его сопряженность с характеристиками климата водосбора. Стокообразующие факторы можно разделить на атмосферные факторы, факторы подстилающей поверхности и факторы бассейнового регулирования. Причем первые непосредственно формируют сток, а вторые и третьи корректируют работу первых. Важнейшими для формирования речного стока атмосферными факторами являются количество осадков и температура воздуха. Они непосредственно определяют количество влаги, поступающей на водосбор в виде жидких и твердых осадков и способной испариться. К факторам подстилающей поверхности относятся рельеф, слагающие горные породы, характер растительности. Факторы подстилающей поверхности косвенно влияют на формирование речного стока, определяя скорость испарения и просачивания влаги, а также перераспределение влаги в пределах

Таблица 4. Корреляция между средними расходами воды в створе г/п Салехард в теплое полугодие и количеством твердых осадков в холодное полугодие (1936–1999 гг.)

Table 4. Correlation between the average water discharge at the Salekhard hydrometric station during the warm half-year and the amount of solid precipitation during the cold half-year (1936–1999)

| Коэффициент корреляции <i>r</i> Correlation coefficient <i>r</i> | Расходы воды в створе г/п Салехард в теплое полугодие Water discharge at the Salekhard hydrometric station during the warm half-year | | | |
|--|---|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| | Бассейн р. Иртыш Irtysh River basin | Бассейн р. Ишим Ishim River basin | Бассейн р. Тобол Tobol River basin | Бассейн Верхней и Средней Оби / Upper and Middle Ob basin |
| Твердые осадки за холодное полугодие / Amount of solid precipitation during the cold half-year | 0,17 | 0,38* | 0,48* | 0,49* |

Примечание. * – значимые коэффициенты ($p < 0,01$).

Note. * – significant coefficients ($p < 0.01$).

речного бассейна. Факторы бассейнового регулирования – площадь бассейна, его средняя высота, уклон и густота речной сети, глубина эрозионного выреза, наличие проточных озер – влияют на пространственно-временное распределение стока.

Основным источником питания для Оби являются атмосферные осадки. Более 50 % питания реки приходится на снег, 20–25 % на дождевое и грунтовое питание [10]. Сток теплого полугодия формируется главным образом за счет осадков: накопленного в холодный период снега и выпадающих в жидком виде в теплый период.

Были рассчитаны средние годовые количества твердых осадков на территориях выделенных подбассейнов в холодное полугодие. Ежегодно с твердыми осадками в бассейн Иртыша поступает 172 км³ воды, в бассейн Верхней и Средней Оби – 168 км³, Тобола – 58 км³, Ишима – 12 км³. Исходя из этого, следует ожидать наибольшего влияния на сток теплого полугодия Нижней Оби осадков, выпадающих на территориях бассейнов Иртыша и Средней и Верхней Оби. Был проведен корреляционный анализ связи между стоком в створе г/п Салехард за теплое полугодие и твердыми осадками за холодное полугодие на территориях рассматриваемых водосборных бассейнов. Наиболее тесная корреляция существует между стоком Нижней Оби и твердыми осадками холодного полугодия в бассейне р. Тобол и в бассейне Верхней и Средней Оби (табл. 4). Согласно исследованию В.В. Поповой с соавторами [11], именно на территориях этих бассейнов находятся две основные области влияния снеготпасов. Одна из них расположена на восточном склоне Среднего Урала в водосборе р. Тобол,

другая на востоке примыкает к водоразделу между Обью и Енисеем.

Полученные коэффициенты корреляции указывают на то, что несмотря на большую площадь и значительное количество твердых осадков в зимний период, бассейн Иртыша не является областью влияния снежного покрова на сток Нижней Оби. В то же время выпадение твердых осадков на значительно меньших по площади водосборах Тобола и Верхней и Средней Оби оказывает более значимое влияние на расходы воды теплого полугодия в нижнем течении реки. Экстремально многоводные 1940, 1947, 1970, 1978, 1998 гг. отмечены совпадением большого количества осадков на водосборах Верхней и Средней Оби и Тобола в холодное полугодие. В экстремально маловодном 1966 г. зарегистрирован минимум твердых осадков в зимний период на водосборах этих рек.

В 1946 экстремально многоводном году отмечалось большое количество осадков в теплое полугодие на водосборе Иртыша, в 1972 – на водосборе Верхней и Средней Оби. Высокая водность 2003 г. и минимумы водности 1981 и 2014 гг. не соотносятся с колебаниями осадков на водосборах, значит, ключевыми факторами их возникновения являлись другие параметры.

Колебания температуры воздуха на водосборах могут влиять на объем речного стока. Эвапоранспирация интенсивнее всего происходит в теплый период года, поэтому наибольшее влияние на речной сток теплого полугодия должна оказывать температура воздуха над водосбором непосредственно в этот период. Были рассчитаны коэффициенты корреляции между стоком Нижней Оби и

теплое полугодие и характеристиками водосбора в этот период года (табл. 5).

Теснота связи между осадками и температурами на водосборе и расходами воды может зависеть от площади водосбора, ведь объем воды, соответствующий количеству осадков в миллиметрах, и объем испаренной влаги зависят от площади. Тогда наибольшую связь следовало бы ожидать для водосборов Иртыша и Верхней и Средней Оби. Корреляционный анализ связей между средними расходами воды в створе г/п Салехард в теплое полугодие и осадками и температурой воздуха в подбассейнах в этот период года показал значимые связи между этими переменными. Самую низкую корреляцию осадков и температур с расходами воды в нижнем течении Оби за период с 1936 по 1999 г. имеет бассейн Верхней и Средней Оби, что не соответствует распределению площадей между бассейнами. Корреляция осадков с расходами воды выше у небольших бассейнов рек Ишим и Тобол. Причиной этому могут быть разнонаправленные колебания параметров климата в различных частях больших по площади бассейнов. Для распределения осадков характерна большая неоднородность, чем для распределения температуры, так как выпадение осадков в большей степени зависит от локальных условий рельефа.

Был проведен анализ корреляции между расходами воды в створе г/п Салехард в холодное полугодие и количеством осадков и температурой воздуха в исследуемых речных бассейнах (табл. 6).

Связь расходов воды Нижней Оби с осадками и температурами на территории водосборов менее выражена в холодное, чем в теплое полугодие. Расходы воды в холодное полугодие показывают слабую прямую корреляцию со средними температурами в этот период. Это может быть связано с тем, что количество и продолжительность зимних оттепелей отражаются на средней температуре. При повышении средней температуры, но отсутствии увеличения количества и продолжительности зимних оттепелей, характер связи между величинами, вероятно, был бы другим.

Метод восстановления значений годового стока Оби по стоку за теплое полугодие. Сток теплового полугодия в большей степени определяется атмосферными факторами, в то время как в холодный период года их значение существенно снижается. Формирование межennaleго стока во многом определяется характеристиками водосбора и слабо коррелирует с метеорологическими параметрами [12]. Показанные выше оценки корреляций подтверждают, что это правомерно и для Оби.

Такие метеорологические параметры, как температура воздуха и осадки, отличаются большей однородностью на обширных участках суши, чем строение речных водосборов и характеристики подстилающей поверхности. По этой причине сток теплового полугодия, лучше коррелирующий с метеорологическими параметрами, представляется более эффективным для построения регрессионных за-

Таблица 5. Корреляция между средними расходами воды в створе г/п Салехард, количеством осадков и температурой воздуха в теплое полугодие (1936–1999 гг.)

Table 5. Correlation between the average water discharge at the Salekhard hydrometric gauge station, the amount of precipitation and air temperature during the warm half-year (1936–1999)

| Коэффициент корреляции r Correlation coefficient r | Расходы воды в створе г/п Салехард в теплое полугодие Water discharge at the Salekhard hydrometric station during the warm half-year | | | |
|--|---|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| | Бассейн р. Иртыш Irtysh River basin | Бассейн р. Ишим Ishim River basin | Бассейн р. Тобол Tobol River basin | Бассейн Верхней и Средней Оби / Upper and Middle Ob basin |
| Количество осадков в теплое полугодие / Amount of precipitation during the warm half-year | 0,40* | 0,44* | 0,45* | 0,35* |
| Средняя температура воздуха в теплое полугодие / Average air temperature during the warm half-year | -0,32* | -0,29* | -0,31* | -0,21 |

Примечание. * – значимые коэффициенты ($p < 0,01$ для осадков, $p < 0,05$ для температуры воздуха).
Note. * – significant coefficients ($p < 0.01$ for precipitation, $p < 0.05$ for air temperature).

Таблица 6. Корреляция между средними расходами воды в створе г/п Салехард в холодное полугодие, количеством осадков и температурой воздуха (1936–1999 гг.)

Table 6. Correlation between the average water discharge at the Salekhard hydrometric gauge station during the cold half-year and the amount of precipitation and air temperature (1936–1999)

| Коэффициент корреляции r Correlation coefficient r | Расходы воды в створе г/п Салехард в холодное полугодие Water discharge at the Salekhard hydrometric station during the cold half-year | | | |
|--|---|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| | Бассейн р. Иртыш Irtysh River basin | Бассейн р. Ишим Ishim River basin | Бассейн р. Тобол Tobol River basin | Бассейн Верхней и Средней Оби / Upper and Middle Ob basin |
| Количество жидких осадков в холодное полугодие / Amount of liquid precipitation during the cold half-year | 0,17 | 0,07 | -0,08 | 0,30* |
| Количество осадков в теплое полугодие / Amount of precipitation during the warm half-year | 0,29* | 0,22 | 0,46* | 0,20 |
| Средняя температура воздуха в холодное полугодие / Average air temperature during the cold half-year | 0,27* | 0,29* | 0,27* | 0,21 |
| Средняя температура воздуха в теплое полугодие / Average air temperature during the warm half-year | -0,18 | -0,17 | -0,29* | -0,02 |

Примечание. * – значимые коэффициенты ($p < 0,05$).

Note. * – significant coefficients ($p < 0.05$).

висимостей с климатическими характеристиками, чем сток холодного полугодия или годовой. Однако значимость моделирования стока за полугодие не столь велика, как месячного и годового. Поэтому еще на этапе целеполагания важно определить пути перехода от полугодовых к месячным или годовым значениям стока.

Несмотря на то, что годовой сток Оби на 80 % и более формируется из стока за теплое полугодие, значимой корреляции и линейной зависимости между ними не наблюдается. Однако многолетний ход РИК годового стока Оби очень точно повторяет ход РИК стока за теплое полугодие (рис. 2). Коэффициент корреляции между ними за период с 1930 по 1999 г. составил 0,9.

Расчитав РИК для теплого полугодия, можно восстановить годовую РИК, а от нее перейти к годовым расходам воды. Для расчета годовой РИК можно использовать коэффициент вариации и среднее значение годового стока за доступный период наблюдений. Эти величины показывают стабильность при большом количестве лет наблюдений.

На имеющихся данных был поставлен численный эксперимент. Согласно условиям эксперимента, имеются данные о средних расходах воды в теплое полугодие за период продолжительностью 70 лет (1930–1999) и о средних годовых расходах воды за период продолжительностью 30 лет (1930–1959). Необходимо восстановить средние годовые расходы воды за период продолжительностью 40 лет (1960–1999).

По имеющимся данным были вычислены РИК расходов воды теплого полугодия за период с 1930 по 1999 г. и РИК годовых расходов воды с 1930 по 1959 г. Для периода наличия обеих РИК было получено уравнение их линейной зависимости:

$$y = 1,0453 \cdot x + 2,698.$$

С использованием уравнения и РИК расходов воды теплого полугодия была восстановлена РИК годовых расходов воды для периода отсутствия годовых данных.

Для 30-летнего периода наличия годовых данных были рассчитаны среднее многолетнее и коэф-

фициент вариации, которые позволили перейти от годовой РИК к годовым расходам воды (рис. 3).

Восстановленные средние годовые расходы соответствуют измеренным на 94 %. Таким образом, переход от расходов теплого полугодия к годовым не будет создавать существенных погрешностей. Задача восстановления стока реки Обь за теплое полугодие путем построения регрессионных зависимостей с климатическими характеристиками актуальна и будет решена в дальнейших исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистически значимые изменения годового стока Оби в период исследования не были выявлены. Однако слабая тенденция к его снижению все же прослеживается. Это может быть связано с ростом испарения на фоне начавшегося в 1970-х гг. повышения температуры воздуха над водосбором. Причем повышение температуры произошло в первую очередь за счет ее роста в зимний период. Участвовавшие зимние оттепели определили увеличение водности Оби в холодное полугодие.

Огромная площадь водосборного бассейна Оби является причиной большого разнообразия метеорологических условий на отдельных его участках. Разнонаправленные тенденции многолетних колебаний климатических характеристик отдельных участков водосбора делают анализ влияния климата на формирование стока реки весьма сложной задачей. В водосборном бассейне реки было выделено 4 локальных участка, которые оказывают значимое влияние на режим стока Оби. Это позволило определить локальные зоны влияния тех или иных метеорологических параметров.

Водность года определяется в первую очередь водностью теплого полугодия. На сток теплого полугодия наибольшее влияние оказывает количество

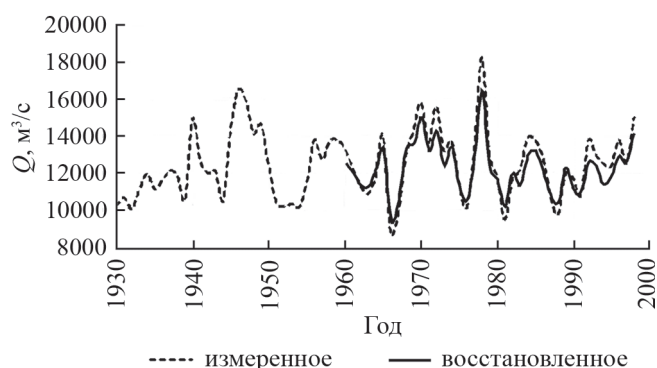


Рис. 3. Средние годовые расходы воды р. Обь в районе г/п Салехард, измеренные и восстановленные.

Fig. 3. Annual average water discharge at the Salekhard hydrometric gauge station (measured and restored).

твердых осадков предшествующего холодного полугодия и осадки в теплое полугодие. Были определены локальные зоны влияния твердых осадков на сток Нижней Оби в теплое полугодие. Наиболее значимо количество твердых осадков, выпадающих в бассейнах Тобола и Верхней и Средней Оби. Значительная часть экстремально многоводных для Оби лет может быть объяснена совпадением максимумов твердых осадков в этих бассейнах.

Сток Оби в теплое полугодие имеет более тесную связь с характеристиками климата, чем в холодное. Выявленные парные корреляции стока Оби с метеорологическими параметрами отдельных участков водосбора заложили основу для построения множественных регрессионных зависимостей и восстановления стока теплого полугодия. Предложенный метод восстановления годовых расходов воды по РИК стока за теплое полугодие может быть использован для других рек с преобладанием снегового питания.

Работа выполнена в рамках госзадания № 0228-2019-0029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кулаков М.Ю. 2012. О новом подходе к моделированию циркуляции вод арктических морей. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2(92): 55–62.
- Berezovskaya S., Yang D., Kane D.L. 2004. Compatibility analysis of precipitation and runoff over the large Siberian watersheds. *Geophysical Research Letters*. 31(21): L21502. doi: 10.1029/2004GL021277
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. *Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТТ)*. Свидетельство о государственной

регистрации базы данных № 2014620942. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 03.02.2020).

- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. *Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394*. URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 03.02.2020).
- Крюкова С.В., Симакина Т.Е. 2018. Оценка методов пространственной интерполяции метеорологических данных. *Общество. Среда. Развитие*. 1: 144–151.

6. *A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region*. URL: <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/Tiles/arctic10.html> (дата обращения: 04.02.2020).
7. Magritskii D.V. 2008. Anthropogenic impact on the runoff of Russian rivers emptying into the Arctic Ocean. *Water Resources*. 35(1): 1–14. doi: 10.1134/S0097807808010016
8. Корзун В.И., Соколов А.А., Будыко М.И., Воскресенский К.П., Калинин Г.П., Коноплянцев А.А., Короткевич Е.С., Кузин П.С., Львович М.И. 1974. *Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли*. СПб., Гидрометеиздат: 637 с.
9. Smith L.C. 2000. Trends in Russian Arctic river-ice formation and breakup, 1917 to 1994. *Physical Geography*. 21(1): 46–56. doi: 10.1080/02723646.2000.10642698
10. Алёшина Н.И., Гэфке И.В. 2019. Особенности гидрологического режима Верхней Оби для возможности водохозяйственного использования. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 11-2(38): 57–60. doi: 10.24411/2500-1000-2019-11751
11. Попова В.В., Шмакин А.Б., Симонов Ю.А. 2010. Изменения снегозапасов и жидких осадков и их роль в колебаниях стока крупнейших рек бассейна Северного Ледовитого океана при современном потеплении. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 23: 109–127.
12. Комлев А.М. 2002. *Закономерности формирования и методы расчета речного стока*. Пермь, изд-во Пермского университета: 163 с.
13. Kulakov M.Yu. 2012. [About the new approach to modelling of water circulation of the Arctic seas]. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2(92): 55–62. (In Russian).
14. Berezovskaya S., Yang D., Kane D.L. 2004. Compatibility analysis of precipitation and runoff over the large Siberian watersheds. *Geophysical Research Letters*. 31(21): L21502. doi: 10.1029/2004GL021277
15. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. *Opisanie massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukhа i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR). Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2014620942*. [Description of the data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations in Russia and the former USSR (TTTR). Certificate of registration of the database No 2014620942]. Available at: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (accessed 3 February 2020). (In Russian).
16. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. *Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh Rossii. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2015620394*. [Description of the data array of monthly precipitation amounts at Russian stations. Certificate of registration of the database No 2015620394]. Available at: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (accessed 3 February 2020). (In Russian).
17. Kryukova S.V., Simakina T.E. 2018. [Estimation of spatial interpolation methods for meteorological data]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie*. 1: 144–151. (In Russian).
18. *A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region*. Available at: <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/Tiles/arctic10.html> (accessed 4 February 2020).
19. Magritskii D.V. 2008. Anthropogenic impact on the runoff of Russian rivers emptying into the Arctic Ocean. *Water Resources*. 35(1): 1–14. doi: 10.1134/S0097807808010016
20. Korzun V.I., Sokolov A.A., Budyko M.I., Voskresenskiy K.P., Kalinin G.P., Konoplyantsev A.A., Korotkevich E.S., Kuzin P.S., Lvovich M.I. 1974. *Mirovoy vodnyy balans i vodnye resursy Zemli*. [World Water Balance and Water Resources of the Earth]. St Petersburg, Gidrometeoizdat: 637 p. (In Russian).
21. Smith L.C. 2000. Trends in Russian Arctic river-ice formation and breakup, 1917 to 1994. *Physical Geography*. 21(1): 46–56. doi: 10.1080/02723646.2000.10642698
22. Aleshina N.I., Gefke I.V. 2019. [Features of the hydrological regime of the Upper Ob for the possibility of water management]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 11-2(38): 57–60. (In Russian). doi: 10.24411/2500-1000-2019-11751
23. Popova V.V., Shmakina A.B., Simonov Y.A. 2010. [Changes in snow storage and liquid precipitation and their role in variations of runoff in largest rivers of the Arctic Ocean basin under contemporary warming]. *Problemy ekologicheskogo monitoringа i modelirovaniya ekosistem*. 23: 109–127. (In Russian).
24. Komlev A.M. 2002. *Zakonomernosti formirovaniya i metody rascheta rechnogo stoka*. [Regularities of formation and methods of calculation of river flow]. Perm, Perm University: 163 p. (In Russian).

REFERENCES

Поступила 24.01.2020