

ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА СИБИРСКИХ РЕК

Г.В. Алексеев, А.Е. Вязилова, Н.Е. Харланенкова, Н.И. Глок
ФГБУ «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия

IMPACT OF GLOBAL WARMING ON SIBERIAN RIVERS DISCHARGE

G.V. Alekseev, A.E. Vyazilova, N.E. Kharlanenkova, N.I. Glok
Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

Рассматривается влияние изменений глобальных климатообразующих факторов (атмосферная циркуляция, осадки, содержание влаги в атмосфере) на формирование стока главных сибирских рек: Оби, Лены и Енисея.

Impact of global climatic factors (atmospheric circulation, precipitation, surface air moisture content) on conditions for main Siberian rivers: Ob, Lena and Yenisei discharge formation is investigated.

Ведение

Содержанию пресной воды (СПВ) в Арктическом бассейне уделяется большое внимание как источнику притока опресненных вод в северную часть Атлантического океана, влияющих на Атлантическую термохалинную циркуляцию. По оценке [1] в среднем за год приток пресной воды в Арктику определяется речным стоком (42%), притоком через Берингов пролив (32%) и чистым количеством осадков (26%). Ранее Aagaard & Carmack (1989) [2] оценили вклад речного стока в 56% при 28% притока через Берингов пролив и 15% чистых осадков.

По данным работы [2] половина среднего за год притока речных вод в СЛО приходится на три крупнейшие сибирские реки: Обь, Енисей и Лена, поэтому изменения их стока будут характеризовать климатические изменения притока речных вод в СЛО.

Относительно причин этих изменений, особенно значительных в последние два десятилетия, нет единого мнения. В частности, относительно роли атмосферной циркуляции и связанных с ней изменений в осадках и температуре воздуха на водосборных бассейнах и их влияния на сток. Потепление климата в течение последних десятилетий сопровождается ростом температуры воздуха, увеличением количества атмосферных осадков и изменением речного стока с тенденцией к увеличению.

Цель нашего исследования — оценить влияние изменений глобальных климатообразующих факторов, таких как атмосферная циркуляция, осадки, содержание влаги в атмосфере на условия в области формирования стока трех главных сибирских рек.

Данные и методы

Используются данные температуры воздуха, влагосодержания из реанализов NCEP (1948-2018) [3], ERA/Interim (1979-2018) [4], данные об осадках на суше PREC/L [5], поля осадков проекта GPCC (Global Precipitation Climatology Center) [6]. Данные речного стока за 1936-2018 гг. получены из следующих источников: массивы данных R-ArcticNet [7], ArcticGRO [8].

Для проведения исследования были выделены географические регионы, включающие области водосбора отдельных рек и общий водосбор: область 51,25° – 68,75° с. ш., 61,25°–88,75° в. д. для водосбора Оби; 51,25° – 68,75° с. ш., 91,25° – 108,75° в. д. для Енисея; 51,25° – 68,75° с. ш. 111,25° – 131,25° в. д. для Лены; 70° – 50° с. ш., 60° – 160° в. д. для трех рек.

Определялись средние по областям, включающим водосбор рек, среднемесячные температура воздуха и осадки. По данным о среднемесячной приповерхностной температуре воздуха из реанализов рассчитывались индексы зональной, меридиональной и общей циркуляции по методике из работы [9]. Применялись методы многомерного взаимно-корреляционного и взаимно-спектрального анализа, разложение по ЕОФ, построения распределений повторяемости значений менее 10% и более 90% обеспеченности.

Результаты

Влияние атмосферной циркуляции на климатические условия на водосборах. Индексы влияния

При усилении зонального и меридионального переноса тепла атмосферной циркуляцией пространственные контрасты приповерхностной температуры воздуха уменьшаются, а при ослаблении переносов, наоборот, возрастают. На этом основании были предложены [10] индексы для оценки влияния колебаний атмосферных переносов на среднюю приповерхностную температуру воздуха на полушарии, Земле в целом и в отдельных областях.

Индекс влияния зональной циркуляции D_Z рассчитывается по формуле:

$$D_Z = \frac{1}{2\pi(\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi \int_0^{2\pi} (T_{\varphi\lambda} - T_{\varphi})^2 d\lambda d\varphi \quad (1)$$

Индекс влияния меридиональной циркуляции D_M определяется формулами:

$$D_M = \left\langle (T_{\varphi} - \langle T_{\varphi} \rangle)^2 \right\rangle_{\varphi}, T_{\varphi} = \langle T_{\varphi\lambda} \rangle_{\lambda}, \langle T_{\varphi} \rangle = \langle T_{\varphi} \rangle_{\varphi} \quad (2)$$

и характеризует неоднородность распределения температуры вдоль меридиана от экватора до полюса. Угловые скобки означают осреднение по широте φ , или по долготе λ ,

Индекс совместного влияния зональной и меридиональной или общей циркуляции определён как

$$D = (D_Z + D_M)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Средний квадрат отклонения приповерхностной температуры воздуха от соответствующих средних в формулах для D_Z и D_M входит в определение доступной потенциальной энергии в атмосфере [11; 12].

Влияние на приповерхностную температуру воздуха (ПТВ), содержание влаги и осадки на водосборах

Наиболее заметное влияние зональные переносы оказывают на ПТВ в Азии к северу от 40° с. ш., а влияние меридиональных переносов сказывается в более северных областях, включая Арктический бассейн. Области влияния зональных и меридиональных переносов на ПТВ включают водосборные бассейны сибирских рек и, следовательно, переносы могут влиять на климатические условия на водосборах. Заметим, что зональные переносы оказывают отопляющее влияние только в холодную часть года с октября по март.

Расчеты корреляций между индексами и климатическими параметрами на водосборах подтвердили это предположение. Все коэффициенты подтверждают значимое влияние атмосферных переносов на приповерхностную температуру воздуха, содержание влаги в атмосфере и осадки (в меньшей степени) в холодную часть года.

Связь между климатическими условиями в областях водосборов и речным стоком

Проведена оценка влияния изменений приповерхностной температуры воздуха и осадков в областях водосбора на сток. Расчеты коэффициентов корреляции между средней температурой воздуха и средними осадками в областях водосбора и годовым стоком рек показали, что наибольшее влияние на сток оказывают средние за год, особенно на сток Лены осадки (коэффициент корреляции 0.77) (рис. 1).

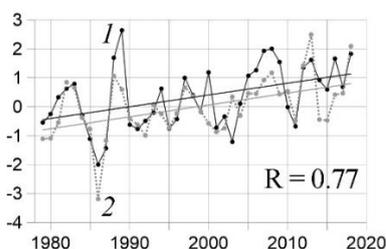


Рис. 1. Связь между среднегодовым стоком реки Лены и среднегодовыми осадками в бассейне реки Лены (нормированные значения, 1 – сток, 2 – осадки).

Влияние изменений температуры заметнее при осреднении температуры по всем трем бассейнам, особенно для средней за год температуры. Наибольший коэффициент корреляции наблюдается между суммарным годовым стоком 3-х рек и среднегодовой ПТВ в общей области

водосбора 3-х рек, рассчитанный по данным реанализа ERA/Interim за 1979–2018 гг., составляет 0.56.

Основной вклад в связь между климатическими показателями и стоком вносят тренды, которые показывают изменения одного знака. Максимальные положительные тренды средних температур воздуха и осадков характерны для весеннего периода. Наибольший рост осадков наблюдается в марте в области водосбора р. Оби (0.67 мм/год) и в мае в области водосбора р. Лены (0.63 мм/год) и р. Енисей (0.32 мм/год). Для среднегодовых и средних за холодный период года температур воздуха и осадков также характерен рост, как и для годовых стоков рек.

Многолетние изменения параметров стока и климата в области водосбора

Положительные коэффициенты тренда годового стока рек Оби, Лены и Енисея показывают рост расходов и годового стока трех рек, которые максимальны для р. Лены ($500.41 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1} \text{ год}^{-1}$ в период 1936-2018 гг., $1079.73 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1} \text{ год}^{-1}$ в период 1979-2018). Суммарный годовой сток трех рек также растет в период 1936-2018 гг. (рис. 2а) с линейным трендом $2.216 \text{ км}^3 \text{ год}^{-1}$ и абсолютным максимумом в 2007 году. Среднемесячные значения расходов на всех трех реках возрастали более всего в мае. В июне, когда в основном отмечался максимальный расход на трех реках, расходы убывали в течение 1936-2018 и 1979-2018 гг. (рис. 2б).

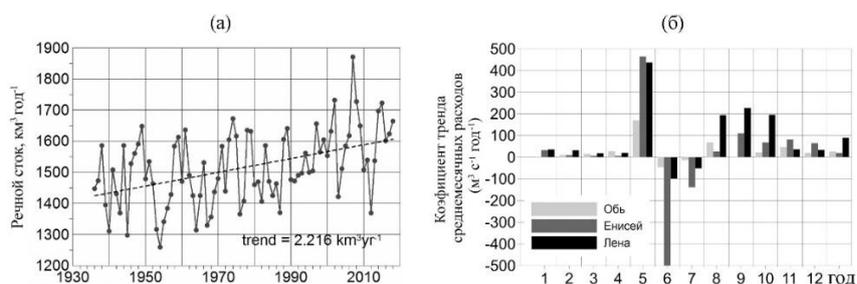


Рис. 2. Суммарный годовой сток трех рек в период 1936-2018 гг. (а), коэффициенты трендов среднемесячных расходов ($\text{м}^3 \text{ с}^{-1} \text{ год}^{-1}$) в 1979-2018 гг. (б)

Максимальные расходы и связанные с ними паводки на реках представляют угрозу для населения, живущего в речных долинах. С этой точки зрения уменьшение максимальных расходов — благоприятное последствие потепления. Другим важным показателем влияния паводков является их повторяемость при изменениях климата. Для оценки изменений повторяемости максимальных расходов были рассчитаны интегральные повторяемости малых расходов менее 10% и больших расходов, превышающих 90% обеспеченность (рис. 3).

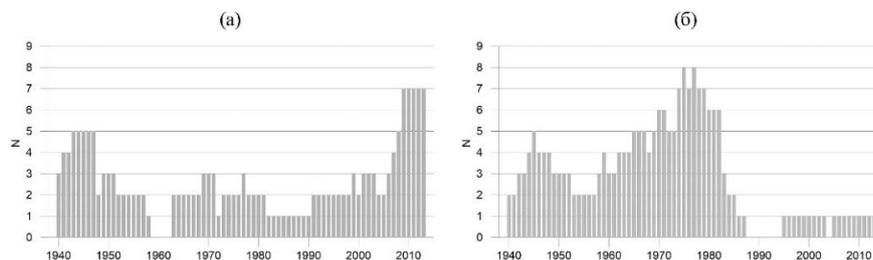


Рис. 3. Количество значений (а) <10% обеспеченности, (б) > 90% обеспеченности максимальных расходов на трех реках в 9-летних скользящих интервалах.

Из рисунка видно рост числа малых максимумов в периоды 1940-50 гг. и в 2000-е гг. и увеличение числа максимальных расходов в 1970-80-е годы. Можно предположить, что в периоды потеплений преобладают меньшие максимальные расходы, при похолодании растет число максимальных расходов. Расчеты повторяемости температуры воздуха в областях водосбора трех рек (рис. 4) подтверждают это предположение.

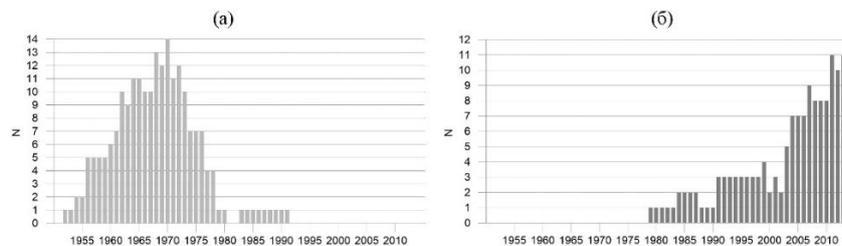


Рис. 4. Количество значений (а) <10% обеспеченности, (б) > 90% обеспеченности среднегодовой температуры воздуха в областях водосборов в 9-летних скользящих интервалах.

Выводы

Климатические условия в областях водосбора главных сибирских рек формируются под влиянием атмосферной циркуляции, приносящей тепло, влагу и осадки. Атмосферные переносы влияют более всего в холодную часть года, особенно в ноябре и марте. Летом усиление зональной циркуляции сопровождается понижением температуры воздуха в области водосборов, а меридиональные переносы повышают температуру.

Переносы зимой формируют сходные изменения средних значений температуры, содержания влаги и осадков в областях водосборов, в то время как летом изменения не связаны или противоположны в области водосборов Оби и Лены.

Наибольшее влияние на сток оказывает рост средних за год осадков, особенно на сток Лены. Влияние изменений температуры заметно при осреднении по всем трем бассейнам для средней за год температуры.

Годовой сток рек возрастает, особенно сток Лены. Суммарный годовой сток трех рек рос в 1936-2018 гг., со скоростью $2,216 \text{ км}^3\text{год}^{-1}$, а максимальный сток убывал в 1979-2018 гг., со скоростью от $0,14$ (Обь) до $1,0 \text{ км}^3\text{год}^{-1}$ (Енисей).

В 2000-е годы повторяемость максимумов стока менее 10% обеспеченности увеличилась, а больших максимумов более 90% обеспеченности уменьшилась. Максимальная повторяемость больших максимумов приходится на 1970-80-е годы. Такое распределение повторяемостей максимумов стока связано с потеплением климата в 2000-е годы и похолоданием в 1970-е годы.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-05-60107).

Литература

1. Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Woodgate R.A., Aagaard K. [и др.]. The large-scale freshwater cycle of the Arctic // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006. № C11010 (111). С. 1–19.
2. Aagaard K., Carmack E.C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation // *Journal of Geophysical Research*. 1989. № C10 (94). С. 14485–14498.
3. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W.D., Deaven D. [и др.]. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. (77). С. 437–471.
4. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P. [и др.]. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. (137). С. 553–597.
5. Chen M., Xie P., Janowiak J.E., Arkin P. Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations // *Journal of Hydrometeorology*. 2002. № 3 (3). С. 249–266.
6. Adler R.F., Huffman G.J., Chang A., Ferraro R., Xie P.-P. [и др.]. The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present) // *Journal of Hydrometeorology*. 2003. № 6 (4). С. 1147–1167.
7. Lammers R.B., Shiklomanov A.I., Vörösmarty C.J., Fekete B.M., Peterson B.J. R-ArcticNet, A Regional Hydrographic Data Network for the Pan-Arctic Region (ISO-image of CD-ROM). PANGAEA. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.859422>.
8. Shiklomanov A.I., Holmes R.M., McClelland J.W., Tank S.E., Spencer R.G.M. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset, Version 20190402. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arcticrivers.org/data>.
9. Алексеев Г.В. Арктическое измерение глобального потепления // *Лед и снег*. 2014. № 2. Р. 53–68.
10. Алексеев Г.В., Подгорный И.А., Священников П.Н. Колебания отепляющего влияния океанов на глобальный климат // *ДАН СССР*. 1991. № 1 (320). С. 70–73.
11. Ван Мигем Ж. Энергетика атмосферы. Под ред. Л.Т. Матвеев. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 327 р.
12. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 259 р.