

УДК 551.34;556.3

## ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА СЕВЕРНЫХ РЕК КАК ИНДИКАТОР ИЗМЕНЕНИЯ КРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Академик РАН В. П. Мельников<sup>1,2</sup>, П. В. Пикинеров<sup>3,\*</sup>,  
В. Б. Геннадиник<sup>2</sup>, А. Г. Бабушкин<sup>1</sup>, Д. В. Московченко<sup>4</sup>

Поступило 22.03.2019 г.

Исследовано новое явление — рост стока северных рек в зимний и ранневесенний периоды. Из предположения, что причиной эффекта является деградация вечной мерзлоты в бассейнах рек, сделана оценка скорости деградации различных зон распространённости многолетнемёрзлых пород (ММП). Математическая модель, учитывающая типизацию зон ММП, отражающая зависимость стока от криологических условий водосбора, показала ускоренную деградацию островной мерзлоты и рост доли прерывистой мерзлоты за счёт интенсивного перехода в это состояние участков сплошной мерзлоты.

**Ключевые слова:** гидрологический режим рек, сток, деградация вечной мерзлоты.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-56524876679-683>

Характеристики водных объектов служат удобными для наблюдения индикаторами состояния природной среды всего водосборного бассейна [3]. Всё больше исследований подтверждает, что в Арктике происходят изменения климата, которые также сказываются на гидрологическом цикле поверхностных вод [7]. В частности, за последнее десятилетие в арктических реках отмечено увеличение среднего расхода воды [10], а также переход к наступлению раннего весеннего половодья [9]. Наблюдения за речным стоком и качеством воды в Арктике позволяют интерпретировать другие крупномасштабные изменения гидрологического и гидрохимического циклов, поскольку речной сток связан с изменением уровня осадков, испаряемостью, грунтовым питанием [6].

Климатические изменения способны инициировать изменения вечной мерзлоты, которые могут привести к изменению как гидрологического режима, так и годовых объёмов расхода воды [11]. Одним из последствий увеличения температуры ММП и сезонно-талого слоя (СТС) является увеличение грунтового питания рек. Frey, McClelland [5] и Rowland, et al. [8] показали, что деградация вечной мерзлоты может привести к переходу гидрологической системы от преобладающего поверхностного пита-

ния к подземному. Зимний расход воды в реках, бассейн которых находится в криолитозоне, подвержен положительному влиянию роста как зимней, так и летней температуры, изменяясь линейно с процентом площади непрерывной вечной мерзлоты [4]. Таким образом, изменение гидрологического режима является одним из маркеров динамики геокриологических условий в пределах водосбора.

Цель работы — установить зависимость между параметрами гидрологического режима и геокриологической обстановкой для рек Арктического бассейна.

В работе данные “Региональной сети гидрометеорологических данных Панарктического региона” (R-ArcticNET (актуальная информация доступна по адресу: <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/>)) дополнены актуальными данными измерения расходов воды (период с 2000 по 2015 г.) для “замыкающих” наблюдательных постов (измерения осуществлял Росгидромет) крупнейших рек Арктического бассейна: Обь (Салехард), Лена (Кюсюр), Енисей (Игарка). Актуальные данные наблюдений были получены от “Проекта обсерватории великих арктических рек” (Arctic Great Rivers Observatory Project) (грант NSF-1107774).

Рост зимне-ранневесеннего стока и его зависимость от мерзлотных условий иллюстрируется графиками на рис. 1, построенными по данным наблюдений Росгидромета. Ряды наблюдений получены путем “соединения” данных из R-ArcticNET v. 4 (1930–1999) и данных, представленных Arctic Great Rivers Observatory Project (2000–2015). На диаграммах показан нормированный к среднему за весь

<sup>1</sup> Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской Академии наук, Тюмень

<sup>2</sup> Тюменский государственный университет

<sup>3</sup> Тюменский индустриальный университет

<sup>4</sup> Институт проблем освоения Севера Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской Академии наук, Тюмень

\*E-mail: [pavel@gisi.ru](mailto:pavel@gisi.ru)

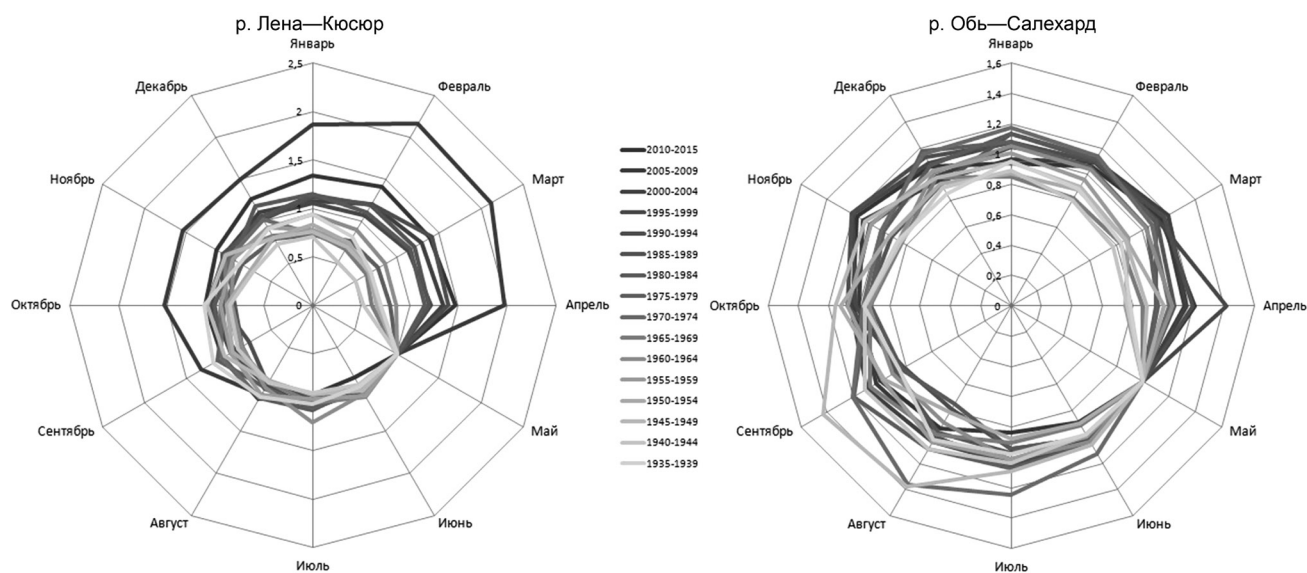


Рис. 1. Диаграмма нормированных среднемесячных расходов воды.

период наблюдений средний по пятилетиям расход воды. Нормированный расход за май принудительно назначен равным 1 ввиду большой вариативности данных (от 6 до 360% от среднего).

На первом годографе (Лена—Кюсюр) виден аномальный рост стока (1,5–2 раза) в феврале–апреле в конце прошлого и в текущем столетии. Подобный, но значительно менее выраженный эффект наблюдается и на втором годографе (Обь—Салехард). Это подтверждает предположение о том, что рост стока вызван изменением мерзлотных условий. Практически весь бассейн Лены находится в зоне вечной мерзлоты, в то время как в ней расположена лишь незначительная часть бассейна Оби, соответственно влияние деградации ММП на увеличение стока для Лены много важнее.

Доля зимнего грунтового питания в общем стоке пропорциональна площади, занимаемой мёрзлыми породами: оно практически отсутствует в условиях сплошной вечной мерзлоты и максимально там, где мерзлоты нет совсем. Для моделирования грунтового питания в соответствии с картой “Подземных льдов СССР” [1] принята переменная “распространённость многолетнемёрзлых пород”. На карте выделены три зоны распространённости:

сплошная вечная мерзлота (отсутствие мерзлоты менее чем на 0,1 площади);

прерывистая вечная мерзлота (отсутствие мерзлоты на территории от 0,1 до 0,5 площади);

островная вечная мерзлота (отсутствие мерзлоты на более чем половине площади).

На карту подземных льдов были наложены бассейны изучаемых рек и точки створов (рис. 2). Таким

образом, водосборная область каждого створа характеризуется четырьмя площадями  $S = (S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4)$ , где  $S_1$  — площадь сплошной мерзлоты в водосборе,  $S_2$  — площадь прерывистой мерзлоты,  $S_3$  — площадь островной мерзлоты,  $S_4$  — площадь водосбора, на которой мерзлота не зафиксирована.

Для каждой зоны распространённости вечной мерзлоты в соответствии с количественными показателями распространённости в атласе снежно-ледовых ресурсов определена гидрологическая проницаемость  $\epsilon_i$ , равная среднему значению интервала долей свободных от мерзлоты площадей:  $\epsilon = (0,05 \ 0,3 \ 0,75 \ 1)$ .

Для каждого створа с учётом распространённости мерзлоты в его бассейне вычислена эффективная площадь водосбора  $\sigma = \epsilon \cdot S = \epsilon_i \cdot S_i$ .

Изменение состояния мерзлоты на водосборной площади створа определяется изменением вектора  $S$ . Вектор  $S'$  в некоторый момент времени  $t'$  определяется из вектора  $S$  в предшествующий момент  $t$  оператором сдвига по времени  $A$ :

$$S' = A \cdot \Delta t \cdot S,$$

где  $\Delta t = t' - t$  — время между моментами наблюдения. Коэффициенты  $\alpha_{ij}$  пропорциональны скорости изменения (в нашем случае, скорее, деградации) мерзлоты и обратно пропорциональны характерным временам деградации  $\tau_{ij}$ :  $\alpha_{ij} \sim 1/\tau_{ij}$ .

Можно предположить, что переходы площадей из одной зоны распространённости мерзлоты в другую осуществляются только между соседними нечёткими переменными: из сплошной в прерывистую (и наоборот), из прерывистой в островную (и на-

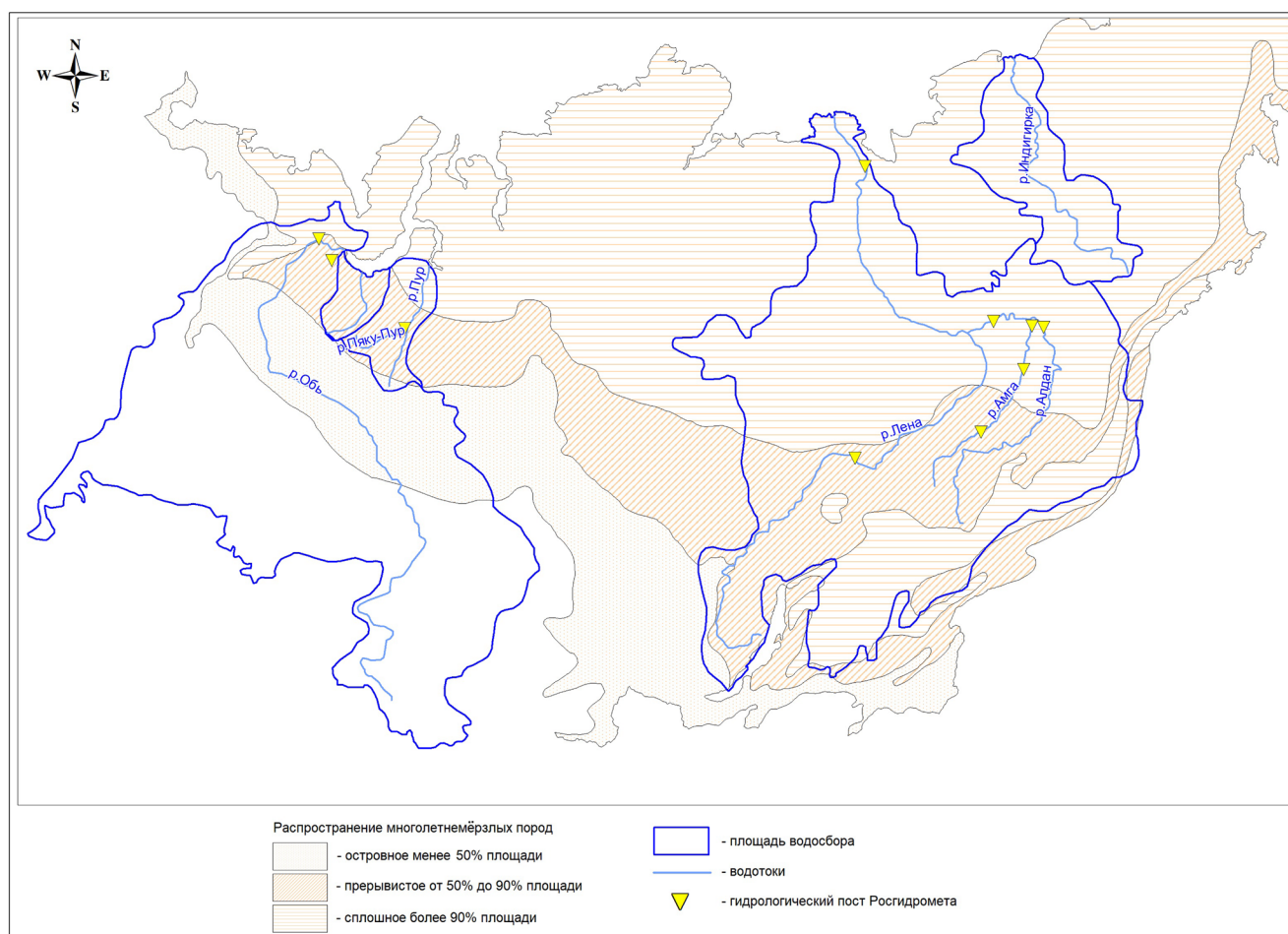


Рис. 2. Границы водосборных бассейнов и распространение многолетнемерзлых пород.

оборот), из островной в область без мерзлоты (и наоборот). Следовательно, матрица  $A$  имеет почти диагональный вид:

$$A = \begin{pmatrix} 1 - \alpha_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{12} & 1 - \alpha_{23} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{23} & 1 - \alpha_{34} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{34} & 1 \end{pmatrix}.$$

Изменение эффективной площади водосбора определяется изменением вектора площади  $\Delta S$ :

$$\begin{aligned} \Delta \sigma &= \varepsilon \cdot \Delta S = \varepsilon \cdot (A - I) \cdot \Delta t \cdot S, \\ \frac{\Delta \sigma}{\Delta t} &= S_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot \alpha_{12} + S_2(\varepsilon_3 - \varepsilon_2) \cdot \alpha_{23} + \\ &+ S_3(\varepsilon_4 - \varepsilon_3) \cdot \alpha_{34}. \end{aligned}$$

В соответствии с первоначально высказанным предположением изменение стока в  $\mu$ -м створе за  $\nu$ -й временной интервал  $\Delta Q^{\mu\nu} \sim \Delta \sigma^{\mu\nu}$ . В нашем распоряжении имеются данные о  $\Delta Q^{\mu\nu}$  по 13 створам за временной интервал с 1930 по 1999 г. и лишь по двум створам (р. Обь—Салехард, р. Лена—Кюсю) в интервале с 1999 по 2015 г.

Если предположить, что коэффициенты  $\alpha_{ij}$ , определяющие скорость деградации мерзлоты, больше зависят от времени, чем от географического положения, можно записать систему

$$\frac{\Delta \sigma^{\mu\nu}}{\Delta t^{\nu}} = F(\alpha_{12}^{\nu} \quad \alpha_{23}^{\nu} \quad \alpha_{34}^{\nu})$$

и по имеющимся данным методом наименьших квадратов восстановить коэффициенты  $\alpha_{ij}^{\nu}$ . Результаты расчёта дают следующие значения за период с 1930 по 1999 г.:  $\alpha_{12} = 0,0000426$ ,  $\alpha_{23} = 0,0000016$ ,  $\alpha_{34} = 0,0002055$ .

С полученными коэффициентами функция  $\Delta Q^{\mu\nu}(\Delta \sigma^{\mu\nu})$  хорошо описывается линейной зависимостью (рис. 3).

Полученные коэффициенты  $\alpha_{ij}^{\nu}$  отражают относительные скорости деградации различных зон распространённости ММП. Используя экспертные оценки скорости деградации мерзлоты [2], были определены коэффициенты пропорциональности между  $\Delta Q^{\mu\nu}$  и  $\Delta \sigma^{\mu\nu}$ :  $\alpha_{12} = 0,00043$ ,  $\alpha_{23} = 0,000016$ ,



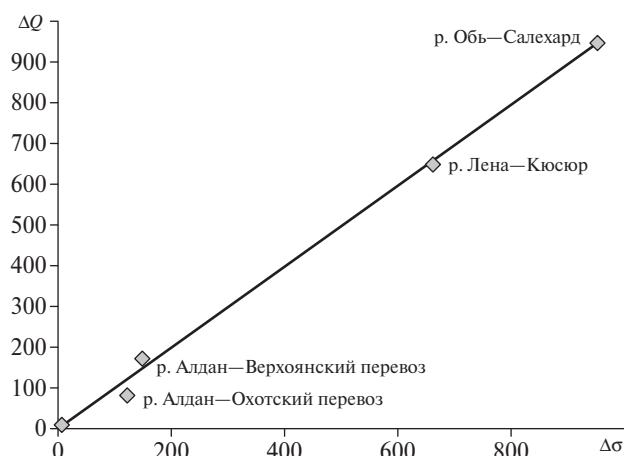


Рис. 3. Зависимость изменения стока от эффективной площади бассейна.

$\alpha_{34} = 0,002$ . Полученным скоростям соответствуют характерные времена деградации 1% территории зоны распространённости ММП: сплошная — 23 года, прерывистая — ~ 600 лет, островная — 5 лет.

При всём косвенном характере результатов они свидетельствуют о наиболее быстрой деградации островной мерзлоты. С учётом того что прерывистая мерзлота в соответствии с моделью деградирует на 2 порядка медленнее островной (а с учётом деградации сплошной мерзлоты её площадь даже заметно растёт), можно предположить заметное сокращение островной мерзлоты в ближайшей перспективе.

В настоящее время в реках Арктического бассейна наблюдается увеличение стока. В речных бассейнах, лежащих в области массивно-островного и сплошного распространения ММП, влияние глобального потепления на расход воды проявляется наиболее явно в зимний период. Наблюдающийся в настоящее время рост зимнего и ранневесеннего стока в северных реках является маркером изменения криологических условий и связан с таянием подземных льдов.

Математическая модель, учитывающая типизацию зон ММП, отражающая зависимость стока от криологических условий водосбора, показала ускоренную деградацию островной мерзлоты и рост доли прерывистой мерзлоты за счёт интенсивного перехода в это состояние участков сплошной мерзлоты.

Для уточнения модели необходимо привлечение дополнительных актуальных данных и уточнение

существующих геокриологических условий северных рек.

**Источник финансирования.** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18–55–11005 АФ\_т (КлимЭко).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Под ред. В.М. Котлякова. М.: РАН, 1997. 392 с.
2. Павлов А.В., Гравис Г.Ф. Вечная мерзлота и современный климат // Природа. 2000. № 4. С. 10–18.
3. Соловьев И.Г., Пикиноров П.В., Шмелева Т.А. Математические методы контроля нефтезагрязненности водотоков на месторождениях с длительными периодами ледостава. I. Модель // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 2. С. 25–31.
4. Adam J.C., Lettenmaier D.P. Application of New Precipitation and Reconstructed Streamflow Products to Streamflow Trend Attribution in Northern Eurasia. // J. Climate. 2008. V. 21. P. 1807–1828. DOI: 10.1175/2007JCLI1535.1.
5. Frey K.E., McClelland J.W. Impacts of Permafrost Degradation on Arctic River Biogeochemistry // Hydrol. Process. 2009. V. 23. P. 169–182. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7196>
6. Karlsson J.M., Jaramillo F., Destouni G. Hydro-Climatic and Lake Change Patterns in Arctic Permafrost and Non-Permafrost Areas // J. Hydrol. 2015. V. 529. P. 134–145.
7. Rawlins M.A., Steele M., Holland M.M., et al. Analysis of the Arctic System for Freshwater Cycle Intensification: Observations and Expectations // J. Climate. 2010. V. 23. P. 5715–37.
8. Rowland J.C., et al. Arctic Landscapes in Transition: Responses to Thawing Permafrost. EOS. 2010. V. 91. P. 229–230. <http://dx.doi.org/10.1029/2010EO260001>
9. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Rawlins M.A., Smith L.C., Pavelsky T.M. Temporal and Spatial Variations in Maximum River Discharge From a Bew Russian Dataset // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JG000352>
10. White D., et al. The Arctic Freshwater System: Changes and Impacts // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. G04S54. <http://dx.doi.org/10.29/2006JG000353>
11. Zhang T., Serreze M.C., Yang D., Gilichinsky D., Etringer A., Ye H., Barry R.G., Chudinova S.M. Permafrost Degradation and Hydrologic Response in the Russian Arctic Drainage Basin // Geophys. Res. Abstr. 2003. V. 5. Abstract 12990. <http://www.cosis.net/abstracts/EAE03/12990/EAE03-J-12990.pdf>

## **RUNOFF OVER SIBERIAN RIVER BASINS AS AN INTEGRATE PROXY OF PERMAFROST STATE**

**Academician of the RAS V. P. Melnikov<sup>1,2</sup>, P. V. Pikinerov<sup>3</sup>,  
V. B. Gennadinik<sup>2</sup>, A. G. Babushkin<sup>1</sup>, D. V. Moskovchenko<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Center Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation*

<sup>2</sup>*University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation*

<sup>4</sup>*Institute of the Problems of Northern Development Tyumen Scientific Center Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation*

Received March 22, 2019

A new phenomenon has been investigated — an increase in the winter and early spring streamflow of northern rivers. Assuming that the increased discharge may be due to permafrost degradation in river basins, the thaw rate was estimated by modeling. A mathematical model that takes into account the typification of the four permafrost categories, reflecting the dependence of the runoff on the cryological conditions of the watershed areas, showed a rapid degradation of sporadic permafrost and expansion of discontinuous permafrost at the account of continuous one.

*Keywords:* hydrological river regime, streamflow, permafrost degradation.