

## Оценка объемов наледей в бассейне реки Индигирка

О. М. Макарьева\*· \*\*, Н. В. Нестерова\*· \*\*· \*\*\*,  
В. Р. Алексеев\*\*\*\*, А. Н. Шихов\*\*\*\*\*,  
А. А. Землянскова\*· \*\*, А. А. Осташов\*

*На основе уточненных данных со спутника “Landsat” за период 2013—2017 гг. выполнена современная оценка наледности, наледных ресурсов в бассейне р. Индигирка и в ее частных водосборах, площадью от 1830 до 305000 км<sup>2</sup>, также рассчитан потенциальный вклад наледного стока в формирование водного баланса рек в разные фазы гидрологического режима. В фазу максимального развития наледность (доля площади, занятой льдами) частных водосборов составляет от 0,30 до 1,49%, достигая 0,54% общей площади бассейна р. Индигирка. Наледные ресурсы (запасы воды в наледях) бассейна р. Индигирка составляют 10,0 мм слоя стока, или 3,5 км<sup>3</sup>. Для отдельных рек наледный сток может достигать 5—28 мм в год, составляя от 2,6 до 20,8% (в среднем 8,1%) речного стока. В среднем запас воды в наледях составляет 235% зимнего стока рек (135% для бассейна р. Индигирка). Доля наледного стока в период весеннего половодья может достигать 39%, а в замыкающем створе р. Индигирка — 13,7%. Неоднозначное влияние изменения климата на наледи (сокращение их площади и увеличение количества) требует дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** наледи, река Индигирка, наледный сток, гидрологический режим, наледные ресурсы, криолитозона северо-востока России.

DOI: 10.52002/0130-2906-2022-3-81-90

### Введение

Наледи — это ледяные поля, ежегодно возникающие в долинах рек криолитозоны в результате послойного намораживания излившихся подземных вод в условиях сурового климата [2]. Их площадь колеблется от нескольких гектаров до десятков квадратных километров. По масштабам своего развития наледная форма оледенения в ряде регионов в несколько раз превышает суммарную площадь ледников. В горах, в бассейнах малых

\* Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук; e-mail: otakarjeva@gmail.com (Макарьева Ольга Михайловна).

\*\* Санкт-Петербургский государственный университет.

\*\*\* Государственный гидрологический институт.

\*\*\*\* Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук.

\*\*\*\*\* Пермский государственный национальный исследовательский университет.

и средних рек суммарная площадь наледных участков может достигать 3—5%.

Наледи регулируют поверхностный и подземный сток, являются важнейшим элементом водообменных процессов криолитозоны. В условиях потепления климата необходимы современные оценки вклада наледного стока как одного из возможных факторов, определяющих изменения в системе водообмена поверхностных и подземных вод бассейнов рек криолитозоны России [7, 22, 27].

Цель работы — дать оценку наледности (доли площади, занятой наледями), наледных ресурсов (объемов воды, содержащихся в наледях) бассейна р. Индигирка и ее частных водосборов в современный период, а также рассчитать потенциальный вклад наледного стока в формирование водного баланса рек в разные фазы гидрологического режима. Новизна данного исследования заключается в применении современных данных о распространении наледей в бассейнах рек северо-востока России; для построения карт наледей ранее использовались данные 1940—1950-х годов [4, 5, 11], и до настоящего времени карты не обновлялись.

### Объект исследования

Большая часть бассейна р. Индигирка представляет собой горную страну с рядом отчетливо выраженных хребтов с максимальной высотой до 3003 м. Территория исследования известна как район, в котором находится полюс холода Северного полушария. Абсолютные минимумы температуры воздуха в Оймяконе достигают рекордных значений —  $-71^{\circ}\text{C}$ . Бассейн реки относится к району распространения зоны сплошной мерзлоты. Из всех крупных арктических рек бассейн реки Индигирка занимает первое место в мире по наледности. Для реки характерен восточно-сибирский тип водного режима с ярко выраженным весенне-летним половодьем, летне-осенними паводками и низкой зимней меженью. Среднегодовой расход р. Индигирка в замыкающем створе у гидрометстанции Воронцово (площадь бассейна  $305\,000\text{ км}^2$ ) составляет  $1600\text{ м}^3/\text{с}$  (объем годового стока  $\sim 50\text{ км}^3$ ).

В исследовании использованы современные данные о распространении наледей в бассейне р. Индигирка, полученные на основе анализа снимков со спутника “Landsat” за период 2013—2017 гг. [8, 23]. Согласно этим данным, число наледей площадью более  $0,01\text{ км}^2$  составляет 1213, а их суммарная площадь на даты снимков —  $1287,4\text{ км}^2$ . Более ранние сведения, содержащиеся в работе [11], свидетельствовали о 897 наледях суммарной максимальной площадью  $1986\text{ км}^2$ . Большинство наледей в Кадастре [4] было выделено на основе геоморфологических признаков путем дешифрирования максимальной площади наледных полей. Более 600 наледей, идентифицированных на современных снимках “Landsat”, отсутствуют в Кадастре [8, 23], 60 из них имеют площадь более  $1\text{ км}^2$  с максимальной величиной  $9,9\text{ км}^2$ . Из 897 наледей Кадастра [4] 211 отсутствуют на современных снимках, средняя площадь этих наледей составляет  $0,7\text{ км}^2$ , максимальная —  $8,5\text{ км}^2$ . В Кадастре [4] указана площадь 180 из 211 наледей, не обнаруженных на снимках “Landsat”: 37 наледей (21% общего числа с приведенной площадью) по сведениям Кадастра [4] имели площадь, равную или превышающую  $1\text{ км}^2$ , при этом общая площадь этих 37 наледей

составляет  $95 \text{ км}^2$ , или 70% от  $135,8 \text{ км}^2$  — общей площади указанных 180 наледей. Если рассматривать 12 самых крупных наледей из Кадастра [4] (с площадью отдельной наледи более  $20 \text{ км}^2$ ) и сравнить с современными оценками по данным “Landsat”, то только одна наледь из этого списка (в бассейне р. Сюрюктях) имеет сопоставимую площадь (более  $70 \text{ км}^2$ ) по данным обоих источников. Другие гигантские наледи, площадь которых в Кадастре [4] по большей части определялась по наледной поляне, в современных условиях гораздо меньше, и даже применение метода корректировки не позволяет получить сопоставимые значения.

Расхождения исторических и современных данных свидетельствуют о том, что, во-первых, произошли изменения динамики наледных процессов в регионе, а во-вторых, наличие наледной поляны на снимках не обязательно обозначает факт формирования наледи в современных условиях, поэтому дешифрирование максимальных площадей по наледным полянам не всегда возможно без подтверждения дешифровочных признаков по наземным данным. В связи с этим авторы настоящей работы ориентировались на данные о площади наледей с современных снимков “Landsat” с использованием метода Б. Л. Соколова [12, 13].

Для расчета вклада наледей в формирование гидрологического режима рек в бассейне р. Индигирка использованы среднемесячные величины слоев стока по десяти гидрологическим постам, в том числе в замыкающем створе р. Индигирка — гидрометеостанция Воронцово (минимальная площадь  $1830 \text{ км}^2$ , максимальная —  $305\,000 \text{ км}^2$ ) (табл. 1, рисунок).

### Методы

Оценка современного распространения наледей выполнена на основе ряда снимков, сделанных в разные даты, что обусловлено наличием облачности, затрудняющей их дешифрирование. Самый ранний снимок был сделан 15 мая, самый поздний из использовавшихся — 18 июня [8]. В период с мая по конец июня происходит наиболее активное разрушение наледей в результате как абляции, так и термоэрозии. По данным Б. Л. Соколова [12, 13], в эти месяцы крупные наледи могут потерять до 70% своей площади и объема, а маленькие могут стаять полностью.

Для компенсации фактора использования снимков за поздние (июньские) даты было проведено уточнение площади наледей, полученных по спутниковым снимкам, с целью приведения величин к максимальным значениям, наблюдаемым в период перед началом таяния. За основу был взят метод расчета уменьшения относительных значений площадей наледей разного размера в течение теплого периода года в зависимости от числа дней после начала таяния, предложенный Б. Л. Соколовым [12, 13]. В работе [13] представлены номограммы для определения интенсивности уменьшения площади наледей для шести групп наледей разного размера:  $0,05$ ,  $0,10$ ,  $0,15$ ,  $0,25$ ,  $0,50$ ,  $0,6—23 \text{ км}^2$ .

На основе полученных данных о максимальной площади наледей был выполнен расчет наледности и наледных ресурсов бассейна р. Индигирка и частных водосборов. Для расчета наледных ресурсов использована формула

$$W = S^n,$$

Таблица 1  
**Наледность частных водосборов бассейна р. Индигирка  
 и роль наледей в формировании речного стока в разные периоды гидрологического цикла**

Код поста	Река — створ	F, км <sup>2</sup>	мм			N	S, км <sup>2</sup>	W, тыс. м <sup>3</sup>	Z, %	%			
			H	H <sub>3</sub>	H <sub>п</sub>					P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	
03488	р. Индигирка — ГМС Юрты	51100	155	8,5	43	387	439,0	847019	0,86	14,4	9,3	169	23,4
03489	р. Индигирка — п. Индигирский	83500	168	6,5	54	491	518,4	998220	0,62	10,4	6,2	160	13,5
03499	р. Сунгар — устье р. Сахарынья	7680	189	5,5	52	52	62,2	118238	0,81	13,4	7,1	244	18,0
03500	р. Кюбюме — п. Кюбюме	1830	122	5,5	31	12	9,6	17291	0,53	8,2	6,7	149	18,5
03503	р. Агаякан — ГМС Агаякан	7630	204	11	47	67	114,8	229431	1,51	26,2	12,8	238	39,0
03507	р. Эльги — 5,0 км выше устья р. Артык-Юрях	17600	210	4,4	84	68	61,6	121321	0,35	6,0	2,9	136	5,0
03518	р. Нера — п. Ала-Чубук	22300	174	3,0	71	91	66,1	116671	0,30	4,6	2,6	153	4,5
03529	р. Ольчан — 4,5 км выше устья р. Туора-Тас	1830	189	4,6	68	13	14,3	26156	0,78	12,4	6,6	270	12,8
03536	р. Мома — с. Сасыр	2340	133	4,0	67	29	34,9	74456	1,49	27,7	20,8	692	28,9
03871	р. Индигирка — ГМС Воронцово	305000	166	7,4	51	1213	1647,5	3492238	0,54	10,0	6,0	135	13,7

*Примечание.* F — площадь бассейна; H — средний многолетний годовой слой стока; H<sub>3</sub> — слой зимнего стока (октябрь — апрель); H<sub>п</sub> — слой стока половодья (май — июнь); N — количество наледей; S — восстановленная площадь наледей; W — объем воды, заключенной в наледях, рассчитанный по восстановленной площади; Z — наледность бассейна; H<sub>1</sub> — наледные ресурсы; P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> и P<sub>3</sub> — наледные ресурсы в процентах от годового, зимнего стока рек и стока в период весеннего половодья соответственно; ГМС — гидрометеорологическая станция.

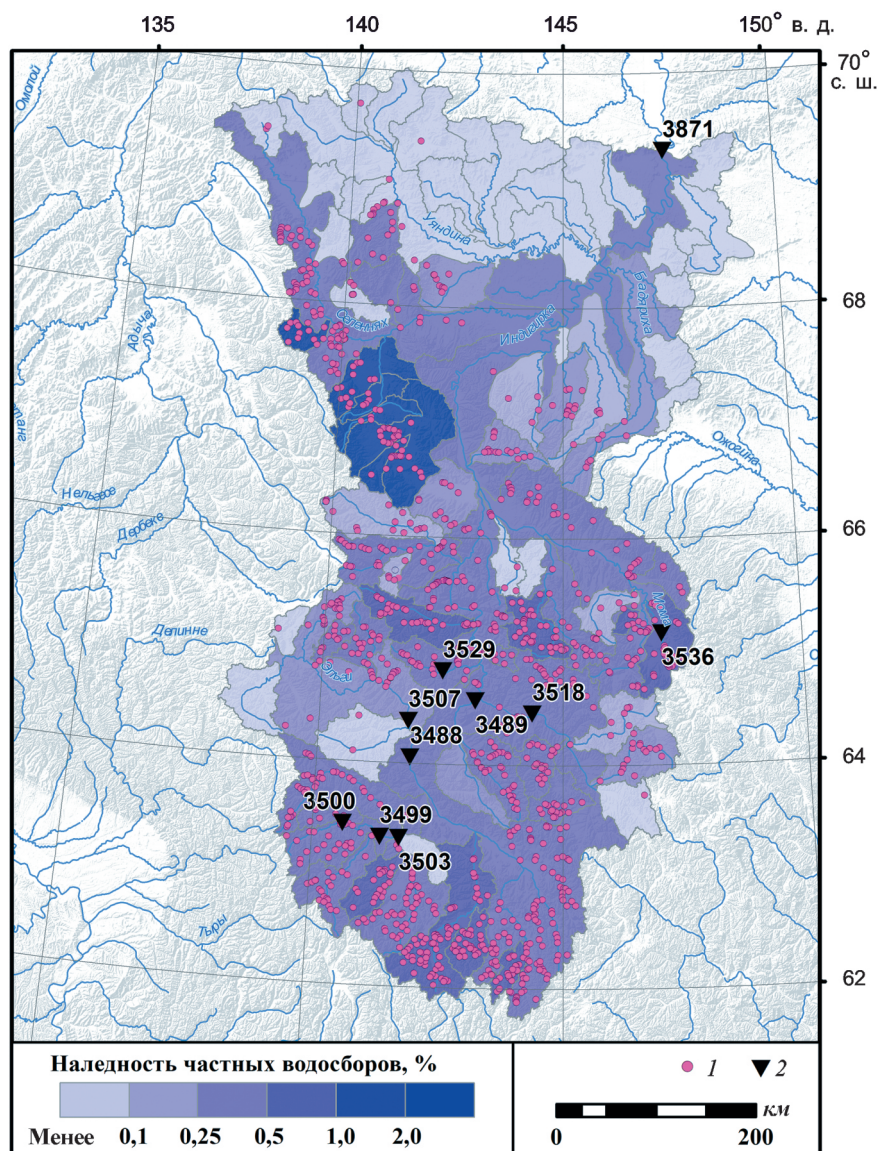


Схема распространения наледей в бассейне р. Индигирка с частными водосборами.

1 — наледь; 2 — гидрологический пост (указан код поста, см. табл. 1).

где  $W$  и  $S$  — объем и площадь наледи, тыс.  $m^3$  и тыс.  $m^2$  соответственно:  $n = 0,75$  и  $n = 1,12$  [14]. Параметры формулы основаны на анализе натуральных данных о средней мощности наледей разных размеров.

Для каждого водосбора (табл. 1) были рассчитаны величины годового стока, а также слои стока за период зимней межени (октябрь — апрель) и весеннего половодья (май — июнь). Для зимнего периода была определена доля стока, которая расходуется на формирование наледи, исходя из объема наледных вод, оцененных по приведенной выше формуле с учетом

плотности льда, равной  $870 \text{ кг/м}^3$ . Доля наледных вод в формировании стока весеннего половодья рассчитывалась в предположении, что за период май — июнь происходит таяние 70% объема наледи [12, 13].

### Результаты

Согласно исходным данным, площади 1213 наледей в бассейне р. Индигирка составляли от 0,01 до  $71,9 \text{ км}^2$ . Число дней таяния для разных частей бассейна и в зависимости от высотной поясности в среднем составило 17 при минимальном и максимальном значениях 0 и 56. Среднее число дней таяния для всех наледей с площадью более  $1 \text{ км}^2$  равно 20, медиана — 17. По номограммам Б. Л. Соколова [13] для категории наледей площадью 0,6— $23 \text{ км}^2$  за этот период потери площади отдельной наледи составляют в среднем 12,8%.

В результате корректировки общая максимальная площадь наледей в бассейне р. Индигирка составила  $1647,5 \text{ км}^2$ . Таким образом, площадь увеличилась на  $367,3 \text{ км}^2$ , или 22,3% по отношению к исходной. Наибольший вклад в увеличение площади (83%) внесли наледи площадью  $>1 \text{ км}^2$  — 309 наледей этой группы составляют 25,5% всего количества наледей (табл. 2).

Площадь считавшейся ранее самой крупной наледи — Момской — была уточнена по более ранним снимкам вручную и составила  $55 \text{ км}^2$ , при этом метод корректировки площади наледи по номограммам Б. Л. Соколова позволил восстановить размер наледи только до  $32 \text{ км}^2$  (табл. 2). Максимальное увеличение площади одной наледи составило  $29,5 \text{ км}^2$ . Некоторые наледи не попали в конкретную размерную категорию — при коррек-

Таблица 2

#### Результаты корректировки максимальной площади наледей по грациям площади

Градации площади наледей, $\text{км}^2$	N	$S_1$	$S_2$	$S_2 - S_1$	, %	, сут	S, %
		$\text{км}^2$					
0,10	5	0,145	0,162	0,017	10,5	5/4 (1—7)	10,6/10,7
0,10—0,15	69	4,0	6,0	2,0	33,9	12/11 (1—19)	27,9/31,6
0,15—0,25	131	10,9	18,4	7,5	40,7	17/17 (1—35)	27,3/35,7
0,25—0,50	202	29,1	43,1	14,0	32,3	21/21 (1—44)	26,0/30,0
0,50—0,60	229	67,6	83,2	15,6	18,7	18/21 (0—54)	11,3/18,4
>0,60	496	1169,9	1496,6	326,7	21,8	21/22 (0—56)	9,1/15,7
20	8	213,0	303,2	90,2	29,7	28/25 (13—33)	25,1/21,4
10—20	20	212,9	288,7	75,8	26,3	31/27 (6—43)	29,2/25,8
5—10	36	178,5	233,1	54,6	23,4	24/25 (9—56)	18,2/22,3
1—5	245	453,7	539,6	85,9	15,9	16/19 (0—56)	9,1/14,6
Неопределенные	81	3,6	5,2	1,6	30,6	28/28 (9—56)	
Всего	1213	1285,3	1647,5	367,3	22,3		

*Примечание.* N — количество наледей;  $S_1$  и  $S_2$  — исходная и восстановленная площадь наледи;  $[(S_1 - S_2)/S_2] \cdot 100\%$  — продолжительность таяния: в числителе — медиана, в знаменателе — среднее значение, в скобках диапазон (минимум и максимум); S — доля площади стаявшей наледи (за период таяния): в числителе — медиана, в знаменателе — среднее.

тировке их поместили в категории, отличающиеся от изначально принятых, их уточненная площадь была принята по минимальному значению (табл. 2, “неопределенные”). Необходимо уточнение параметров метода корректировки [13] в зависимости не только от площади наледей (особенно наиболее крупных), но и от условий погоды, формы наледей и других факторов.

Согласно данным Б. Л. Соколова [12, 13], первая стадия разрушения наледей характеризуется прорывом больших масс подземных вод на поверхность перед началом половодья, что приводит к интенсивному увлажнению поверхности снега и льда и к резкому изменению теплового баланса поверхности наледи. Положительный тепловой баланс и эродирующее и отепляющее воздействие подмерзлотных вод являются основными факторами, вызывающими разрушение наледей еще до перехода среднесуточных значений температуры через  $0^{\circ}\text{C}$ , до начала снеготаяния и весеннего половодья. В настоящей работе период разрушения наледей определен как число дней с положительной среднесуточной температурой воздуха, а воздействие других факторов не учтено. Это означает, что приведенные оценки максимальной площади наледей дают нижнюю границу оцениваемой величины, а на самом деле максимальная площадь может быть еще больше.

Наледность водосборов, рассчитанная по восстановленным данным снимков “Landsat”, колеблется от 0,30 до 1,51% (табл. 1). Наледность бассейна р. Индигирка составляет 0,54%, максимальная величина этого показателя характерна для рек Агаякан (хребет Сунтар-Хаята) и Мома (хребет Черского) — 1,51 и 1,49% соответственно.

Общие наледные ресурсы бассейна р. Индигирка по скорректированным данным “Landsat” составляют 10 мм в единицах слоя стока, или  $3,5 \text{ км}^3$ . Гигантские наледи площадью более  $1 \text{ км}^2$  вносят основной вклад в формирование наледных ресурсов: так, запас льда в гигантской наледи в бассейне р. Сюрюктях (восстановленная площадь  $101,4 \text{ км}^2$ ) может составлять до  $0,3 \text{ км}^3$ .

На основе полученных данных рассчитан вклад наледного стока в водный баланс бассейнов рек в разные фазы гидрологического режима (табл. 1). Средний многолетний годовой сток рассмотренных рек изменяется в пределах от 122 до 210 мм, зимний сток (с октября по апрель) составляет от 3 до 11 мм, а весенний (май — июнь) — от 31 до 84 мм. Большинство малых и средних рек зимой полностью перемерзают.

Для отдельных рек наледный сток может достигать 5—28 мм в год, что составляет от 2,6 до 20,8% (в среднем для рассматриваемых водосборов 8,1%) речного стока. В бассейне р. Индигирка доля наледного стока составляет 6,0% годового стока. Запасы воды в наледях в несколько раз могут превышать сток рек в зимний период. Наледные ресурсы составляют 136—692% (в среднем 235%) от зимнего стока рек, а для всего бассейна р. Индигирка достигают 135%. Таким образом, большая часть речного стока в зимний период уходит на формирование наледей.

Наледи играют значительную роль в формировании стока весеннего половодья в период с мая по июнь. Доля наледного стока в этот период может достигать более 39%, а в среднем для рассматриваемых бассейнов со-

ставляет 18% речного стока. Наибольшее влияние наледей на гидрологический режим наблюдается на реках Мома, Агаякан и в горной части р. Индигирка (выше п. Юрты). В замыкающем створе р. Индигирка доля наледного питания в период весеннего половодья достигает 13,7%.

### Обсуждение

Несмотря на широкое распространение наледей и их значительную роль в динамике водообменных процессов криолитозоны на северо-востоке России, в последние десятилетия их изучение практически прекратилось [1]. Гораздо большее внимание в современной литературе уделяется изучению ледникового покрова и его влияния на формирование стока рек в условиях изменения климата [3, 16, 20]. Однако в бассейне р. Индигирка площадь ледников составляет лишь 0,05% общей площади бассейна [19], в то время как наледность — 0,54%, т. е. почти в 11 раз больше. За период 1970—2003 гг. потери объемов ледникового покрова на хребтах Сунтар-Хаята в бассейне р. Индигирка оцениваются в  $1,4 \text{ км}^3$  [3], составляя только 0,8 мм дополнительного стока в год в замыкающем створе р. Индигирка [8]. Эта величина на порядок меньше величины наледного стока в бассейне р. Индигирка.

Роль наледей существенно отличается от гидрологической роли ледников. Аккумуляция воды в ледниках происходит вследствие выпадения снега, который превращается в лед лишь через несколько лет. Ледниковое питание рек происходит в течение всего теплого периода года, нарастая во второй половине лета. Зимой ледники не влияют ни на подземный, ни на речной сток. Наледи растут в результате послойного намерзания подземной и речной воды. В зимний период эти воды исключаются из влагооборота, а с наступлением тепла поступают в речную сеть [25]. Доля наледного стока в общем речном стоке пропорциональна общей площади наледей в бассейне, а доля ледникового стока определяется только частью ледников ниже границы питания. Кроме того, наледи в бассейне р. Индигирка располагаются в основном в среднем и нижнем ярусах гор [8], ледники лежат в верхних частях горных систем, что определяет разную продолжительность формирования и объем талых наледных и ледниковых вод.

Показательны сведения о ледниковом и наледном стоке в створе р. Агаякан у одноименной метеостанции. Площадь ледников хребта Сунтар-Хаята в этом бассейне составляет около  $78 \text{ км}^2$ , или 1% территории [19]. При этом площадь наледей достигает  $114,8 \text{ км}^2$ , или 1,51% поверхности бассейна (табл. 1). В работе [6] приведены сведения о вкладе наледей и ледников в формирование речного стока р. Агаякан в 1957 г. Так, ледниковый сток составил 3,8% годового и 6,1% стока за июль и август, для сравнения — наледный сток составил 12,8% годового и 39% стока за летний период [6].

В последнее десятилетие отмечается изменчивость динамики наледей в разных природно-климатических условиях и на разных континентах [1, 17, 18, 23, 24]. Реакция наледей на изменение климата будет различной в зависимости от целого комплекса механизмов природной системы, включая изменение функционирования подземных вод, поверхностного стока, климатических факторов [10]. Динамика формирования наледей напрямую связана с зимним стоком рек, изменения которого наблюдаются в разных



частях криолитозоны мира [22, 26, 27]. Для малодоступных арктических регионов результаты исследований динамики наледей на отдельных репрезентативных полигонах, обобщенные для более крупных территорий на основе данных спутниковых снимков, могут помочь в понимании процессов трансформации гидрологического цикла и криолитозоны в целом [21].

### Заключение

Проведен анализ современного состояния наледных ресурсов бассейна р. Индигирка на основе ранее полученных данных дешифрирования снимков со спутника “Landsat” за период 2013—2017 гг. Для компенсации использования снимков в июне, относящихся к периоду активного таяния и поэтому занижающих площадь наледей, был применен метод Б. Л. Соколова [12, 13] для восстановления площадей наледей в период их максимального развития. По результатам расчета максимальная площадь наледей в бассейне р. Индигирка составляет  $1647,5 \text{ км}^2$ , что на 22,3% больше представленной в работе [8]. Запас воды в наледях, оцененный на основе этих данных, составляет 10 мм, или  $3,5 \text{ км}^3$ . Рассчитан вклад наледного стока в формирование водного баланса рек в разные фазы гидрологического цикла. Доля наледного стока в годовой величине в бассейне р. Индигирка составляет как минимум 6,0%. Для отдельных рек этого бассейна наледный сток в среднем — 8,1% речного стока. Наледные ресурсы в зимний период составляют в среднем 235% зимнего стока рек частных водосборов р. Индигирка, а в период весеннего половодья — в среднем 18% речного стока.

Полученные данные могут быть использованы для приблизительной оценки ресурсов подземных вод. Это особенно важно для регионов, где сеть гидрологических наблюдений распределена неравномерно или практически отсутствует [9, 15].

Авторы благодарны рецензенту за конструктивные замечания, позволившие значительно улучшить статью.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00666), Русского географического общества (проект “Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока”, 2019, 2021) и Санкт-Петербургского государственного университета (проект 75295776).

### Литература

- 1. Алексеев В. Р.** Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов. — Лед и снег, 2016, т. 56, № 1, с. 73—93.
- 2. Алексеев В. Р.** Наледи. — Новосибирск, Наука, 1987, 159 с.
- 3. Ананичева М. Д.** Оценка площадей, объемов и высот границы питания ледниковых систем Северо-Востока России по космическим снимкам начала XXI в. — Лед и снег, 2014, № 1, с. 35—48.
- 4. Кадастр** к карте наледей Северо-Востока СССР масштаба 1:2 000 000. /Сост. З. Г. Шильниковская. — Магадан, Центральная комплексная тематическая экспедиция Северо-Восточного геологического управления, 1958, 398 с.
- 5. Карта наледей** Северо-Востока СССР масштаба 1:2 000 000. /Сост. А. С. Симаков, З. Г. Шильниковская. — Магадан, Северо-Восточное геологическое управление Главного управления геологии и охраны недр при Совете Министров РСФСР. Центральная комплексная тематическая экспедиция, 1958.

- 6. Корейша М. М.** Наледи в горах Сунтар-Хаята. — *Материалы гляциологических исследований*, 1972, вып. 19, с. 247—250.
- 7. Макарьева О. М., Нестерова Н. В.** Фазовое состояние осадков как фактор увеличения межлетнего стока в криолитозоне (на примере бассейнов Яны и Индигирки). — *Метеорология и гидрология*, 2020, № 4, с. 95—103.
- 8. Макарьева О. М., Шихов А. Н., Осташов А. А., Нестерова Н. В.** Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным. — *Лед и снег*, 2019, 59(2), с. 201—212; <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388>.
- 9. Пигузова В. М.** Оценка подземного стока в реки зоны многолетней мерзлоты. — *Труды ГГИ*, 1965, вып. 122, Исследование подземного стока в реки, с. 87—107.
- 10. Романовский Н. Н.** Наледи как характерные проявления подземных вод криолитозоны. /В кн.: *Подземные воды криолитозоны*. — М., Изд-во МГУ, 1983, с. 81—133.
- 11. Симаков А. С., Шильниковская З. Г.** Карта наледей Северо-Востока СССР. Краткая объяснительная записка. — Магадан, Северо-Восточное геологическое управление Главного управления геологии и охраны недр при Совете Министров РСФСР, 1958, 40 с.
- 12. Соколов Б. Л.** Наледи и речной сток. — Л., Гидрометеоздат, 1975, 190 с.
- 13. Соколов Б. Л.** Приближенная оценка многолетней изменчивости наледей. /В сб.: *Региональные и тематические геокриологические исследования*. — Новосибирск, Наука, 1975, с. 123—132.
- 14. Соколов Б. Л., Саркисян В. О.** О наледях. /В кн.: *Подземное питание горных рек*. — Л., Гидрометеоздат, 1981, с. 153—184.
- 15. Толстихин О. Н.** Наледи и подземные воды Северо-востока СССР. /В кн.: *Изучение и охрана водных ресурсов*. — М., Наука, 1975, 18 с.
- 16. Bliss A., Hock R., and Radic V.** Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change. — *J. Geophys. Res. Earth*, 2014, vol. 119, pp. 717—730; <https://doi.org/10.1002/2013JF002931>.
- 17. Crites H., Kokeji S., and Lacelle D.** Icings and groundwater conditions in permafrost catchments of northwestern Canada. — *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, 3283.
- 18. Ensom T. P., Makarieva O. M., Morse P. D., Kane D. L., Alekseev V. R., and Marsh P.** The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions. — *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020; <http://dx.doi.org/10.1002/ppp.2051>.
- 19. GLIMS and NSIDC:** Global Land Ice Measurements from Space Glacier Database. Compiled and Made Available by the International GLIMS Community and the National Snow and Ice Data Center, Boulder CO, 2005, U.S.A.; <https://doi.org/10.7265/N5V98602>.
- 20. Huss M. and Hock R.** Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. — *Nature Climate Change*, 2018, vol. 8, pp. 135—140.
- 21. Makarieva O. M., Nesterova N. V., Ostashov A. A., Zemlyanskova A. A., Tumskoy V. E., Gagarin L. A., Ekaykin A. A., Shikhov A. N., Olenchenko V. V., and Khristoforov I. I.** Perspectives for the development of complex interdisciplinary hydrological and geocryological research in the North-East of Russia. — *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Науки о Земле*, 2021, № 1, с. 74—90; <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.102>.
- 22. Makarieva O., Nesterova N., Post D. A., Sherstyukov A., and Lebedeva L.** Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost. — *The Cryosphere*, 2019, vol. 13, pp. 1635—1659; <https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019>.
- 23. Makarieva O., Shikhov A., Nesterova N., and Ostashov A.** Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia). — *Earth Syst. Sci. Data*, 2019, vol. 11, pp. 409—420; <https://doi.org/10.5194/essd-11-409-2019>.
- 24. Morse P. and Wolfe S.** Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada. — *Geophys. Res.: Earth Surface*, 2015, vol. 120, pp. 1670—1686.
- 25. Reedyk S., Woo M. K., and Prowse T. D.** Contribution of icing ablation to streamflow in a discontinuous permafrost area. — *Can. J. Earth Sci.*, 1995, vol. 32, pp. 13—20.
- 26. Spence C., Kokelj S. V., and Ehsanzadeh E.** Precipitation trends contribute to streamflow regime shifts in northern Canada. — *Cold Region Hydrology in a Changing Climate*, IAHS publication, 2011, vol. 346, pp. 3—8.
- 27. Tananaev N. I., Makarieva O. M., and Lebedeva L. S.** Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. — *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43, pp. 10764—10772; <https://doi.org/10.1002/2016GL070796>.