

УДК 556.314.6(282.256.1)

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗЕЙ РЕЧНЫХ И ГРУНТОВЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ СРЕДНЕЙ ОБИ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Лобурь Яна Николаевна¹,
ynl5@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Понимание механизмов и закономерностей изменения подземного стока, условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод бассейна реки Оби в целом и Томской области в частности необходимо для прогнозирования изменений водных ресурсов региона и планирования мероприятий по их комплексному использованию и охране.

Цель: количественная оценка взаимосвязей речных и подземных вод в среднем течении реки Оби (Томская область) по результатам определения отношения инфильтрации к коэффициенту фильтрации и положения уровней грунтовых вод на водоразделах рек.

Методы: статистические методы, методы математического моделирования.

Результаты и выводы. Выполнен анализ данных многолетних гидрологических (22 поста на реке Оби и её притоках) и гидрогеологических (14 гидрогеологических скважин) наблюдений на территории Томской области за период с 1960-х по 2005–2015 гг. Показано, что инфильтрация в целом снижается во время половодья, причем на водоразделах дольше и более плавно, чем в речных долинах. Внутригодовое изменение отношения инфильтрации к коэффициенту фильтрации в большинстве случаев обратно пропорционально изменению среднего значения слоя водного стока смежных рек. Выполнена количественная оценка внутригодовых изменений положения водоразделов рек. Наиболее существенные изменения выявлены на границе между реками Обью и Васюган (скважина 124р), Обью и Шегаркой (63р), Чулым и Кией (81р). Сделан вывод о том, что граница водосборов должна рассматриваться не как линия, а как полоса. Получены подтверждения регионального подземного стока не только вдоль рек, но и в меридиональном направлении (примерно с юга на север).

Ключевые слова:

подземные и речные воды, Средняя Обь, отношение инфильтрации к коэффициенту фильтрации, уровеньный режим.

Введение

В Западной Сибири в голоцене произошли значительные изменения климата и гидросферы [1–4], причём в настоящее время продолжается интенсивное заболачивание этой территории в пределах таёжной зоны [5, 6]. Это обуславливает актуальность исследований в области прогнозирования изменений окружающей среды и повышения безопасности и надёжности технических компонентов природно-техногенных комплексов [1, 7] и определяет их общую цель – выявление закономерностей изменения подземного стока и условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод бассейна реки Оби в голоцене. Предполагается, что наличие подобных знаний позволит оценить направление эволюции болотных экосистем Западной Сибири, уточнить сценарии изменения крупных природно-техногенных комплексов и выработать рекомендации по повышению надёжности и безопасности технических систем, функционирующих в условиях сильной заболоченности и подтопления прилегающих территорий. Ниже эта цель рассмотрена применительно к условиям формирования речных и подземных вод верхней гидродинамической зоны в бассейне р. Обь на участке её среднего течения в пределах Томской области Российской Федерации.

Объекты и методика исследования

Объектами исследования являются непосредственно Обь и её притоки (характеристика рек приве-

дена в [8]) – реки Тым, Кеть с притоком Пайдугина, Чулым с притоком Кия, Томь с притоками Ушайка и Басандайка, Шегарка, Чая с притоками Бакчар и Галка (приток реки Бакчар), Чузык (приток реки Парабель), Васюган с притоком Чижалпа (рис. 1, табл. 1), и предположительно связанные с ними подземные воды верхней гидродинамической зоны, преимущественно грунтовые отложения четвертичного возраста (рис. 1, табл. 2, скважины 124р, 89р, 137р, 445р, 110р, 95р, 81р), частично – артезианские подземные воды отложений палеогенового (167р, 63р, 156р, 113р, 129р) или неогенового (113р, 94р) возраста, в определенной мере связанные с грунтовыми водами четвертичных отложений (с учётом литологии и характера внутригодового изменения уровней подземных вод [9]). Скважина 18р расположена на северной границе Алтае-Саянской гидрогеологической складчатой области, прочие скважины – в пределах Западно-Сибирского артезианского бассейна [10–14].

Источниками информации послужили данные многолетних наблюдений Росгидромета и материалы государственного мониторинга недр на территории Томской области (в разное время – Томская геолого-разведочная экспедиция, АО «Томскгеомониторинг» и Сибирский региональный центр ФГБУ «Гидроспецгеология») за период с начала 1960-х по 2005–2015 гг. (с учетом прекращения наблюдения на ряде постов и скважин), в обобщенной форме опубликованные в [9, 13–15] (более подробная информация приведена в указанных источниках).

Таблица 1. Среднегодовое месячные уровни речных вод на территории Томской области, м (в Балтийской системе высот)

Table 1. Average annual monthly river water levels in the Tomsk region, m (in the Baltic elevation system)

№	Река/River	Пункт/Locality	Месяц/Month											
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	Обь/Ob	Победа/Pobeda	72,29	72,25	72,43	73,58	73,97	73,84	73,28	72,67	72,20	71,97	72,16	72,50
2		Могочино/Mogochino	58,69	58,43	58,32	60,81	64,65	63,55	60,93	59,65	58,99	59,02	59,44	59,31
3		Прохоркино/Prokhorkino	40,70	40,42	40,29	41,38	46,04	46,21	43,85	41,72	41,05	40,97	41,55	41,39
4		Александровское/Aleksandrovskoe	34,19	33,78	33,64	34,59	39,89	40,83	38,67	35,77	34,88	34,73	35,19	34,89
5	Томь/Tom	Томск, г/с/Tomsk, h/s	70,35	70,01	69,91	72,61	74,21	72,08	70,41	70,06	70,06	70,44	70,89	70,66
6	Басандайка/Basandaika	Басандайка/Basandaika	81,43	81,48	81,59	82,01	81,75	81,36	81,25	81,22	81,23	81,28	81,35	81,41
7	Ушайка/Ushayka	Степановка/Stepanovka	79,60	79,65	79,73	80,03	79,80	79,45	79,34	79,33	79,31	79,37	79,49	79,55
8	Чулым/Chulym	Тегульдэт/Teguldet	124,44	124,35	124,30	125,07	127,67	126,90	125,50	124,83	124,56	124,50	124,65	124,67
9		Зырянское/Zyryanskoe	97,29	97,13	97,09	98,11	101,50	100,52	98,58	97,73	97,45	97,46	97,65	97,60
10		Батурино/Baturino	74,70	74,53	74,43	75,12	78,64	77,97	75,71	74,88	74,63	74,64	74,91	74,94
11	Кня/Кня	Окунеево/Okunevo	100,44	100,37	100,38	101,82	104,85	102,67	100,76	100,50	100,53	100,76	101,01	100,71
12	Четь/Chet	Конторка/Kontorka	119,83	119,86	119,90	120,49	122,95	120,70	119,82	119,65	119,55	119,60	119,86	119,80
13	Кеть/Ket	Белый Яр*/Bely Yar*	65,18	65,15	65,17	65,37	67,19	68,36	66,68	65,24	64,99	64,98	65,33	65,35
14	Пайдугина/Paidugina	Берёзовка/Berezovka	75,12	75,12	75,16	75,16	77,11	76,33	75,15	74,82	74,87	75,63	75,49	75,23
15	Тым/Tym	Напас/Naras	63,35	63,32	63,32	63,49	65,48	66,15	64,17	63,58	63,45	63,47	63,75	63,53
16	Шегарка/Shegarka	Бабарыкино/Babarykino	89,23	89,21	89,18	90,75	93,02	90,31	89,78	89,70	89,57	89,56	89,39	89,24
17	Чая/Chaya	Подгорное/Podgomoe	62,60	62,61	62,62	63,21	66,13	64,47	62,94	62,54	62,45	62,53	62,91	62,72
18	Бакчар/Bakchar	Польнянка/Polnyanka	95,91	95,86	95,84	96,59	98,18	96,82	96,19	96,16	96,17	96,21	96,15	96,00
19	Галка/Galka	Бакчар/Bakchar	92,86	92,83	92,81	93,45	94,80	93,65	92,98	92,99	92,94	93,01	92,88	92,87
20	Чузик/Chuzik	Пудино/Pudino	79,62	79,59	79,57	80,01	82,88	80,74	79,96	79,76	79,74	79,84	79,86	79,68
21	Чижанка/Chizhanka	Лавровка**/Lavrovka**	89,35	89,33	89,33	89,47	90,61	90,51	89,84	89,59	89,58	89,57	89,50	89,42
22	Васюган/Vasyugan	Средний Васюган/Sredny Vasyugan	53,69	53,59	53,55	54,33	58,27	58,16	55,54	54,37	54,26	54,27	54,40	53,95

Примечание: номер объекта соответствует рис. 1; * значения среднемесячных уровней воды р. Кеть в створе п. Белый Яр получены линейной интерполяцией в зависимости от площади водосбора между створами у с. Максимкин Яр и с. Родионовка, на р. Томи у с. Батурино – между створами у с. Поломошное и г. Томск (гидрологический створ); ** уровни воды р. Чижанки в районе урочища Лавровка рассчитаны согласно [18] по варианту отсутствия данных наблюдений (использование полиномиальной зависимости между уровнями и расходами воды по уравнениям Шеши–Маннинга и зависимости между среднемесячными расходами р. Чижанки $Q_{чл}$ и р. Васюган у с. Средний Васюган $Q_{всв}$: $Q_{чл} = (0,308 \pm 0,012) Q_{всв} (F_{чл}/F_{члч})$, где $F_{чл}$ и $F_{члч}$ – площади водосборов р. Чижанки в створе Лавровки и Усть-Чурульки).

Note: object number corresponds to Fig. 1; * values of average monthly water levels of the Ket river near the Bely Yar village were obtained by linear interpolation depending on the catchment area between the cross-sections at the Maksimkin Yar village and the Rodionovka village, on the Tom river near the Baturino village were between the cross-sections at the Polomoshnoe village and Tomsk (hydrological section near the Lagerny Sad area); ** water levels of the Chizhanka river nearby the Lavrovka (uninhabited) were calculated by [18] according to the variant of the absence of observational data (using the polynomial dependence between water levels and discharges according to the Shezy–Manning equations and the dependence between the average monthly discharges of the Chizhanka river $Q_{чл}$ and the Vasyugan river near the Middle Vasyugan village $Q_{всв}$: $Q_{чл} = (0,308 \pm 0,012) Q_{всв} (F_{чл}/F_{члч})$, where $F_{чл}$ and $F_{члч}$ are the catchment areas of the Chizhanka river at the Lavrovka and Ust-Churulka sites).

Таблица 2. Среднегодовое месячные уровни подземных вод на территории Томской области, м (в Балтийской системе высот)

Table 2. Average annual monthly groundwater levels in the Tomsk region, m (in the Baltic elevation system)

Скважина/Well	Пункт/Locality	Возраст отложений/Age of deposits	Месяц/Month											
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
124p	Александровское/Aleksandrovskoe	1QIII	37,22	36,88	36,68	36,99	39,53	41,08	40,39	38,69	38,01	37,75	37,84	37,60
167p	Средний Васюган/Sredny Vasyugan	P ₂ tv	60,69	60,72	60,74	60,81	61,51	61,50	60,75	60,57	60,55	60,61	60,68	60,68
89p	Каргала/Kargala	aQ _{mb}	99,18	98,95	99,19	99,38	99,88	99,52	99,77	99,59	99,36	99,31	99,28	99,27
63p	Мельниково/Melnikovo	2aQ _{III} +P _{3II}	78,58	78,54	78,53	78,79	78,99	78,91	78,79	78,71	78,65	78,66	78,65	78,62
137p	Тегульдэт/Teguldet	aQ _{IV}	127,32	127,18	127,17	127,24	127,66	127,99	127,91	127,74	127,62	127,48	127,45	127,41
18p	Предтеченск/Predtechensk	aIQ _{кк} +P _{3nm}	142,70	142,72	142,68	142,87	142,94	142,96	142,93	142,89	142,81	142,80	142,79	142,73
445p	Чернышёвка/Chernyshevka	aIQ _{кк} +IaIQ _{кб}	100,60	100,51	100,59	100,55	100,76	100,79	100,85	100,80	100,74	100,76	100,69	100,56
110p	Бакчар/Bakchar	aQ _{mb}	102,21	102,16	102,21	102,20	102,45	102,44	102,46	102,44	102,38	102,42	102,39	102,33
156p	Напас/Naras	P _{3lg}	63,89	63,89	63,88	64,03	65,66	66,51	64,83	64,21	64,02	64,06	64,17	64,03
113p	Белый Яр/Bely Yar	N ₁	76,39	76,26	76,19	76,19	76,38	76,76	76,82	76,73	76,62	76,56	76,50	76,46
95p	Подгорное/Podgomoe	aQ _{mb}	69,68	69,66	69,64	69,65	69,77	69,97	69,98	69,90	69,78	69,75	69,74	69,72
81p	Зырянское/Zyryanskoe	1Q _{III}	99,20	99,04	98,93	99,08	100,72	101,54	100,70	100,08	99,68	99,47	99,39	99,36
94p	Подгорное/Podgomoe	N ₁	63,94	63,90	63,85	63,95	64,79	65,22	64,81	64,45	64,22	64,07	64,07	64,01
129p	Пудино/Pudino	P _{3lg}	87,07	87,00	86,96	87,08	87,39	87,41	87,30	87,21	87,18	87,14	87,15	87,27

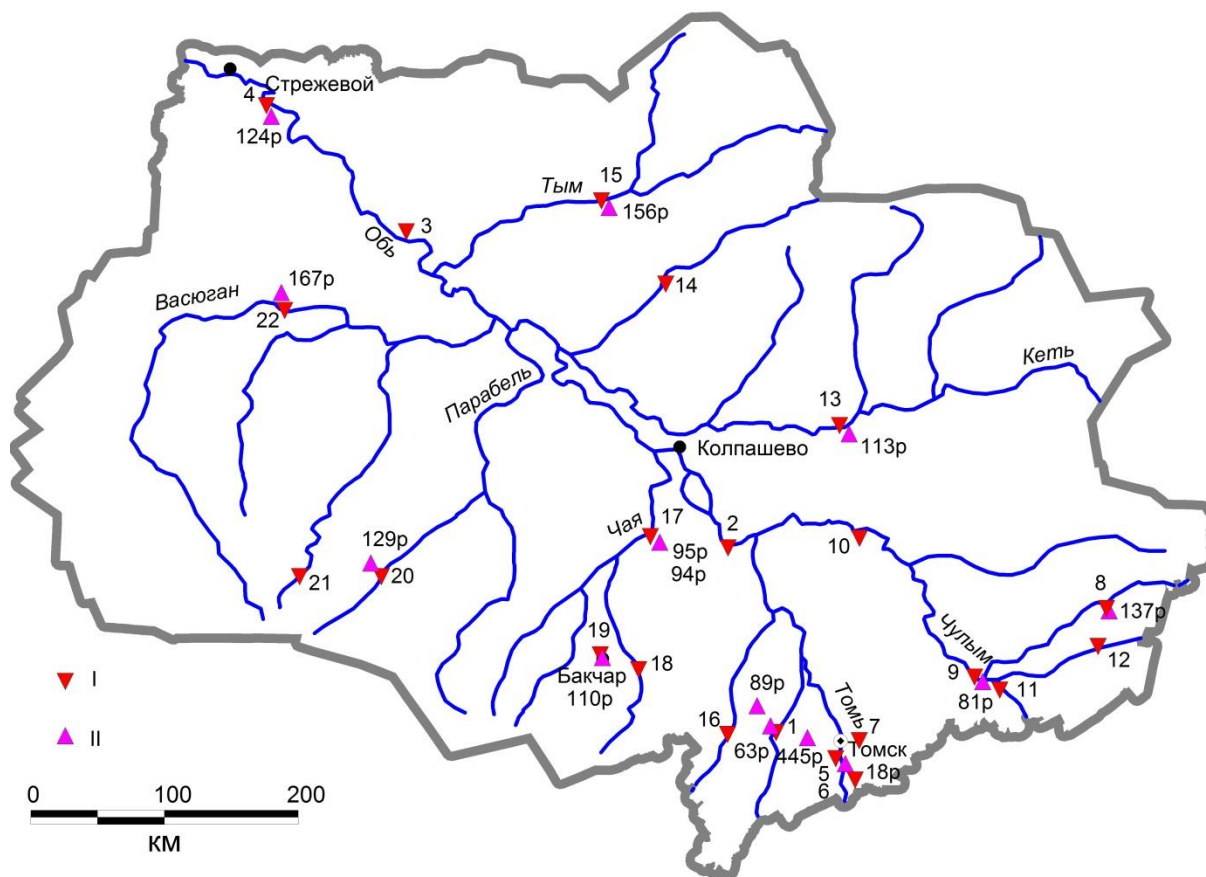


Рис. 1. Схема расположения пунктов многолетних гидрологических (I) и гидрогеологических (II) наблюдений, которые были использованы для анализа

Fig. 1. Layout of the points of long-term hydrological (I) and hydrogeological (II) observations that were used for analysis

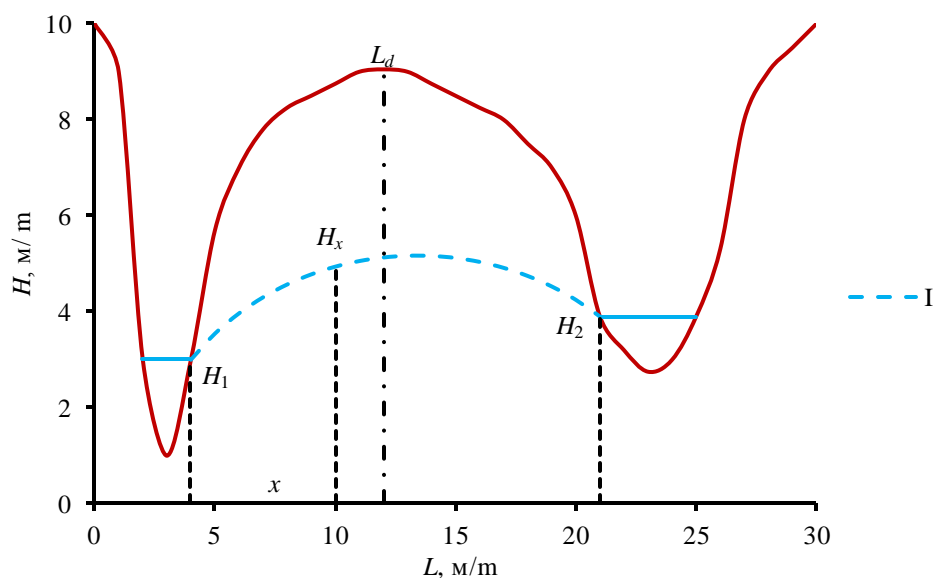


Рис. 2. Схема расчета уровней грунтовых вод (I) между реками: H_1 – уровень воды в реке № 1; H_2 – уровень воды в реке № 2; H_x – уровень грунтовых вод на расстоянии x от уреза реки № 1; L_d – положение водораздела между реками № 1 и 2 относительно реки № 1

Fig. 2. Scheme for calculating groundwater levels (I) between rivers: H_1 is the water level in river no. 1; H_2 is the water level in river no. 2; H_x is the groundwater level at a distance x from the river's edge no. 1; L_d is the position of the watershed between rivers no.1 and 2 relative to river no. 1

Методика исследования основана на допущении, в соответствии с которым движение грунтовых вод в среднем за месячные интервалы рассматривается как условно стационарный процесс, описываемый уравнением Дюпюи с учетом инфильтрации. При этом уровни грунтовых вод междуречий могут быть ориентировочно оценены по уравнению (1), отношение K_f инфильтрации Inf к (среднему по разрезу) коэффициенту фильтрации K_f – по уравнению (2), а положение водораздела L_d – по уравнению (3) [16, 17]:

$$H_{x,i} = \sqrt{H_1^2 - \frac{H_1^2 - H_2^2}{L_{12}} \cdot x + \frac{Inf}{K_f} \cdot (L_{12} - x) \cdot x}, \quad (1)$$

$$K_f = \frac{Inf}{K_f} = \frac{H_x^2 - H_1^2}{(L_{12} - x) \cdot x} + \frac{H_1^2 - H_2^2}{(L_{12} - x) \cdot L_{12}}, \quad (2)$$

$$L_d = \frac{L_{12}}{2} - \frac{K_f}{Inf} \cdot \left(\frac{H_1^2 - H_2^2}{2 \cdot L_{12}} \right), \quad (3)$$

где H_1 и H_2 – уровни воды рек № 1 и 2 (рис. 2); H_x – уровень подземных вод на расстоянии x от уреза реки № 1; L_{12} – расстояние между урезами рек № 1 и 2; L_d – расстояние от уреза реки № 1 до водораздела между смежными реками № 1 и 2 (рис. 2).

При подготовке и анализе данных наблюдений использовались регрессионные зависимости (оценка параметров методом наименьших квадратов) при выполнении условий (4), (5) для уровня значимости 5 %:

$$\delta_r \approx \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (4)$$

$$R^2 > 0,36; \frac{|r|}{\delta_r} \geq 2; \frac{|k_r|}{\delta_k} \geq 2, \quad (5)$$

где N – объем выборки; R^2 – квадрат корреляционного отношения; r и δ_r – коэффициент корреляции и погрешность его определения; k_r и δ_k – коэффициент ре-

грессии и погрешность его определения [18]; расчёты выполнены в среде MS Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

В течение года обычно наблюдается определённое повышение уровней изученных подземных вод с мая по август–сентябрь (табл. 2, рис. 3), причем наиболее длительное и плавное увеличение уровней воды чаще отмечается на водораздельных пространствах (пример – скважины 445р и 18р), а более резкое – в речных долинах. Соответственно внутригодовым изменениям уровней речных (табл. 1) и подземных (табл. 2) вод в среднем за многолетний период отмечается уменьшение отношения K_f (2) инфильтрации к коэффициенту фильтрации в период половодья (рис. 4). Однако отрицательные значения, свидетельствующие о поступлении в водоносные горизонты речных вод, отмечены только в мае для скважин 124р (долина р. Оби), 81р (долина р. Чулым) и 94р (пойма р. Чай).

Еще одна важная особенность заключается в статистически значимых обратных связях между величиной K_f и средним слоем водного стока Y_{12} смежных рек (зависимость вида $K_f = b - a \cdot Y_{12}$, где Y_{12} – среднее арифметическое из слоёв стока смежных рек): условие (4), (5) выполняется для всех случаев со статистически значимыми коэффициентами корреляции (табл. 3).

В течение года меняется и положение границ подземных водосборов (рис. 5), особенно на границе между реками Обью и Васюган (скважина 124р), Обью и Шегаркой (63р), Чулым и Кией (81р), где коэффициент вариации Cv величины L_d составляет от 0,05 до 0,08 ($Cv = \frac{\sigma}{A}$, A и σ – среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение).

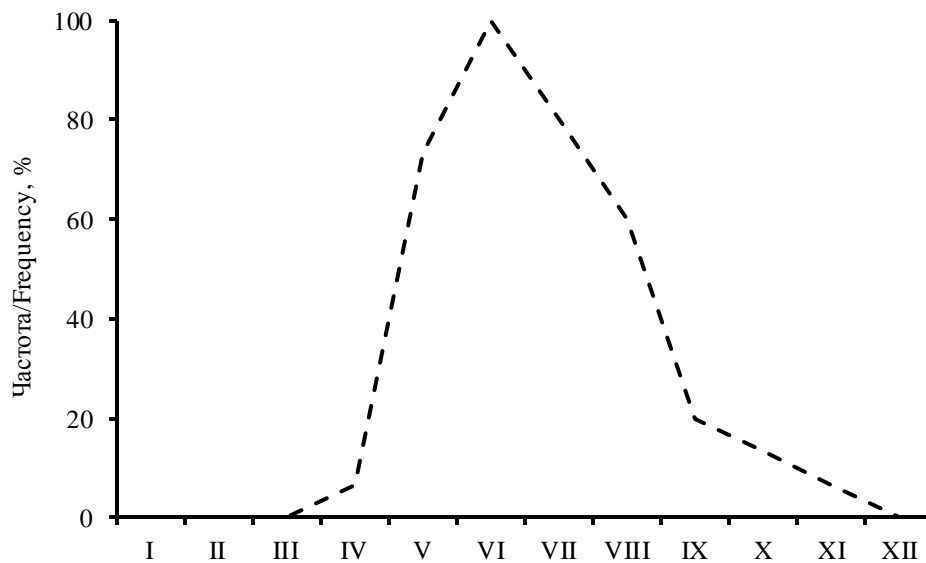


Рис. 3. Внутригодовое изменение средней частоты уровней подземных вод выше 2/3 годовой амплитуды (100 % m/N , m – количество случаев; $N=15$ – количество изученных вариантов)

Fig. 3. Intra-annual change in the average frequency of groundwater levels above 2/3 of the annual amplitude (100 % m/N , m is the number of cases; $N=15$ is the number of options explored)

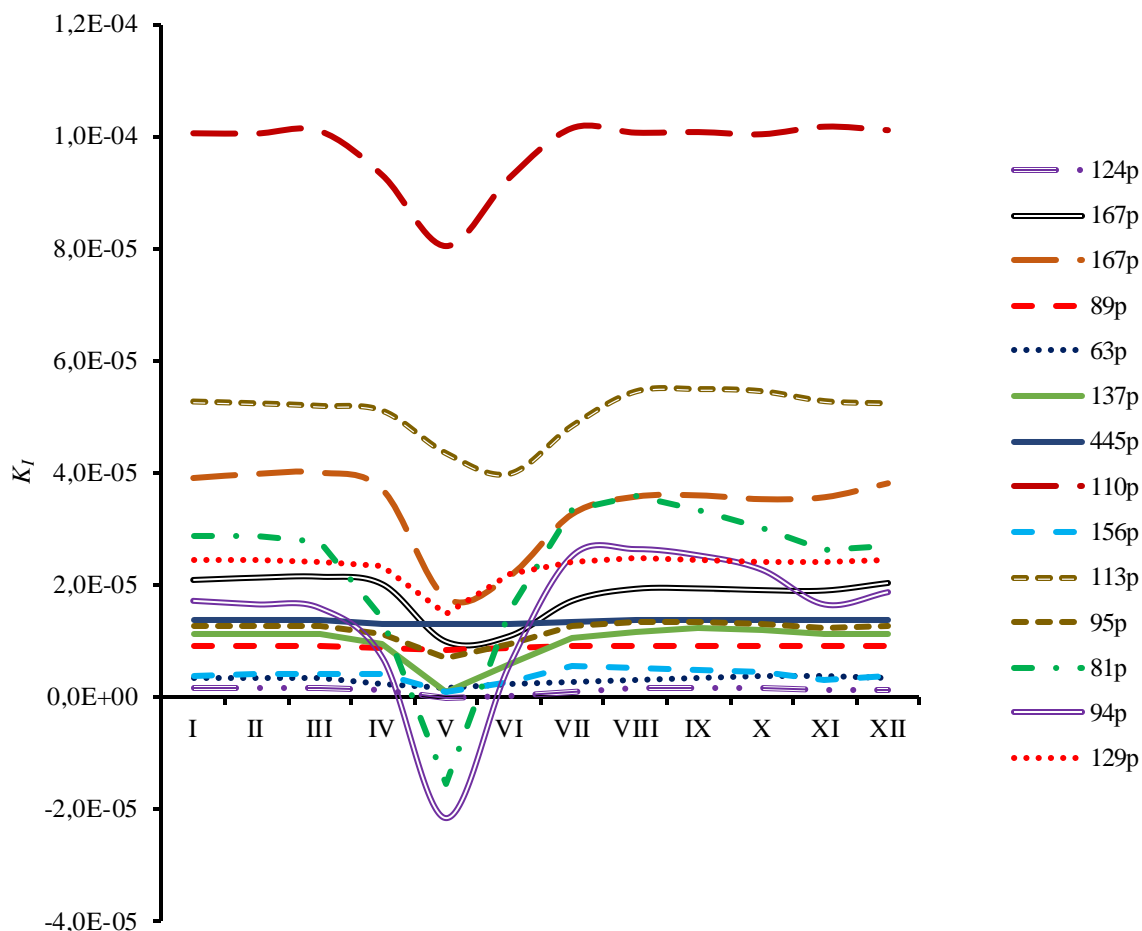


Рис. 4. Внутригодовое изменение отношения инфильтрации к коэффициенту фильтрации K_I (2) в среднем за многолетний период (номера гидрогеологических скважин приведен в табл. 2)

Fig. 4. Intra-annual change in the ratio of infiltration to the filtration coefficient K_I (2) on average over a long period (numbers of hydrogeological wells are given in Table 2)

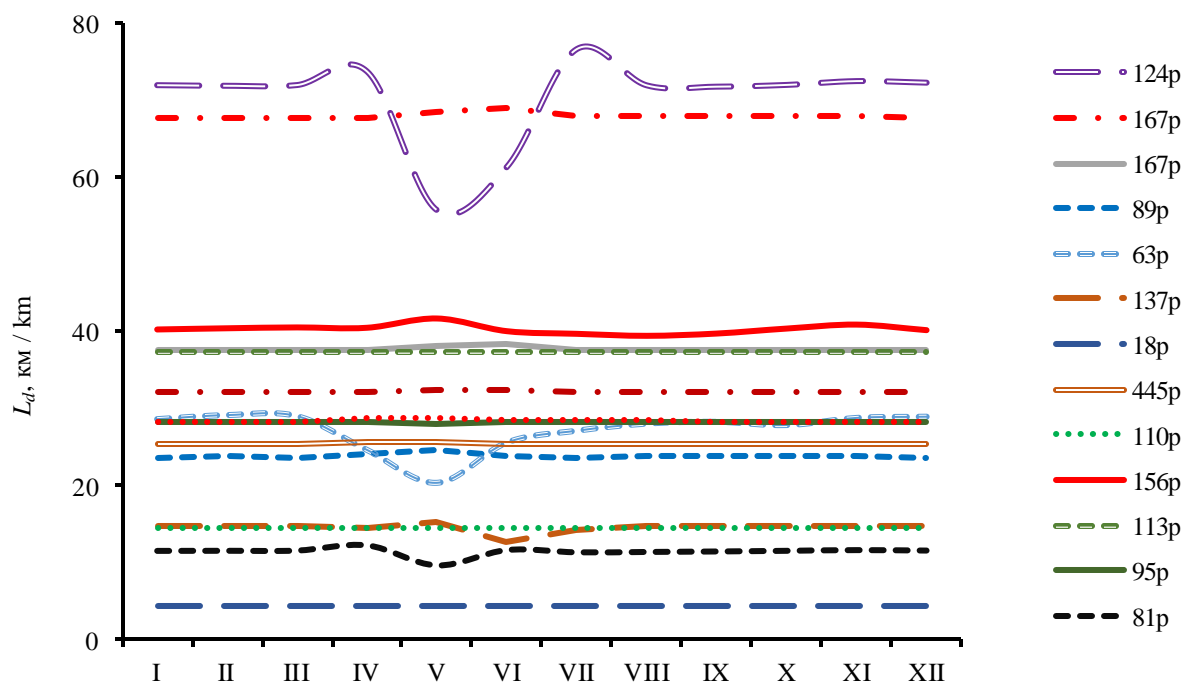


Рис. 5. Внутригодовое изменение расстояния L_d от реки № 1 до водораздела смежных рек № 1 и 2

Fig. 5. Intra-annual change in the distance L_d from river no. 1 to the watershed of adjacent rivers no. 1 and 2

Таблица 3. Среднедолгосрочные уровни изученных подземных и речных вод (обозначения к схеме на рис. 2)

Table 3. Average long-term levels of the studied groundwater and river waters (notations for the scheme in Fig. 2)

Скважина Well	Пункт Locality	$A(K_i)$	$\sigma(K_i)$	r_{1Y}	L_{12}	$A(L_d)$	$\sigma(L_d)$	Порядок расчета: реки 1, 2 (номер по табл. 1) Calculation order: rivers 1, 2 (no. according to Table 1)	$A(H_{gr})$	$A(H_1)$	$A(H_2)$	$A(H_{Ld})$	$\sigma(H_{Ld})$
		10^{-6}			км/км				м/м				
124p	Александровское Aleksandrovskoe	1,10	0,63	-0,89	135,0	70,3	5,8	4–22	38,22	35,92	54,87	82,57	19,55
167p	Средний Васюган	18,21	3,86	-0,91	135,0	68,0	0,3	4–22	60,82	35,92	54,87	288,71	34,10
167p	Sredny Vayugan	34,02	7,11	-0,91	74,6	37,6	0,3	3–22	60,82	42,13	54,87	220,79	24,88
89p	Каргала/Kargala	9,01	0,25	-	39,9	23,8	0,3	1–16	99,39	72,76	89,91	102,05	0,35
63p	Мельниково/Melnikovo	2,99	0,61	-	34,0	27,2	2,6	1–16	78,70	72,76	89,91	89,24	0,77
137p	Тегульдэт/Teguldet	9,89	3,26	-0,83	32,7	14,6	0,6	8–12	127,51	125,12	120,17	133,12	2,38
18p	Предтеченск Predtechensk	723,28	2,32	-	8,9	4,4	0,0	6–7	142,82	81,45	79,56	144,24	0,10
445p	Чернышёвка Chernyshevka	13,48	0,30	-0,59	51,3	25,5	0,1	1–5	100,68	72,76	70,97	118,36	0,33
110p	Бакчар/Bakchar	97,85	6,33	-0,54	28,6	14,4	0,0	19–18	102,34	93,17	96,34	170,14	3,45
156p	Напас/Napas	3,77	1,20	-0,39	76,3	40,3	0,6	15–14	64,43	63,92	75,43	100,85	7,27
113p	Белый Яр/Bely Yar	50,73	4,66	-0,83	75,0	37,3	0,0	10–13	76,49	75,43	65,75	276,06	11,91
95p	Подгорное/Podgomoe	11,92	1,92	-0,90	57,0	28,2	0,1	17–2	69,77	63,14	60,15	115,83	6,49
81p	Зырянское/Zyryanskoe	23,70	14,01	-0,84	22,0	11,4	0,6	9–11	99,77	98,18	101,23	112,98	6,88
94p	Подгорное/Podgomoe	14,58	13,20	-0,78	57,0	28,4	0,2	17–2	64,27	63,14	60,15	134,46	19,31
129p	Пудино/Pudino	23,25	2,72	-0,89	63,4	32,3	0,1	20–21	87,18	80,11	89,67	174,71	8,07

Примечание: $A(H_{gr})$ – среднее арифметическое значение (в целом за многолетний период для всего года) измеренных уровней подземных вод; $A(H_1)$ и $A(H_2)$ – средние арифметические значения (в целом за многолетний период для всего года) уровней воды смежных рек № 1 и 2; L_{12} – расстояние между урезами воды смежных рек; r_{1Y} – статистически значимые коэффициенты корреляции между отношением инфильтрации к коэффициенту фильтрации и средним слоем водного стока смежных рек; $A(K_i)$ и $\sigma(K_i)$ – средние арифметические значения и средние квадратические отклонения величины K_i ; $A(L_d)$ и $\sigma(L_d)$ – средние арифметические значения и средние квадратические отклонения положения водораздела между смежными реками относительно реки № 1; $A(H_{Ld})$ и $\sigma(H_{Ld})$ – средние арифметические значения и средние квадратические отклонения уровней подземных вод на водоразделе; полужирным шрифтом выделены значения $A(H_{Ld})$, превышающие отметки поверхности.

Note: $A(H_{gr})$ is the arithmetic mean value (in general for a long-term period for the whole year) of observed groundwater levels; $A(H_1)$ and $A(H_2)$ are the arithmetic mean values (in general for a long-term period for the whole year) of water levels of adjacent rivers no. 1 and 2; L_{12} is the distance between the water edges of adjacent rivers; r_{1Y} is the statistically significant correlation coefficients between the ratio of infiltration to average hydraulic conductivity and the average layer of the water runoff of adjacent rivers; $A(K_i)$ and $\sigma(K_i)$ are the arithmetic mean values and standard deviations of K_i ; $A(L_d)$ and $\sigma(L_d)$ are the arithmetic mean values and standard deviations of the watershed position between adjacent rivers relative to river no. 1; $A(H_{Ld})$ and $\sigma(H_{Ld})$ are the arithmetic mean values and standard deviations of groundwater levels in the watershed; bold font indicates $A(H_{Ld})$ values that exceed the surface elevations.

При этом положение расчетных уровней воды на водоразделе может превышать отметки поверхности (табл. 3), что, предположительно, объясняется наличием локальных водоупоров и/или анизотропией фильтрационных свойств грунтов и их наклонным залеганием, то есть отклонением от принятых допущений при использовании (1)–(3). С другой стороны, эти отклонения сами по себе являются косвенной характеристикой специфических гидрогеологических условий [16, 19]. Например, в случае междуречья рек Обь и Васюган можно предположить наличие подземного стока не только вдоль русла р. Васюган, но и от р. Васюган в сторону с. Александровское (скважина 124p), примерно вдоль притока р. Оби – р. Ильяк. Аналогичный вывод (о меридиональном направлении подземного стока) вытекает и при анализе отметок поверхности, уровней подземных и речных вод в правобережье р. Оби (рис. 6). Но для его уточнения и объяснения различий в междуречьях Чулыма и Кети, Кети и Пайдугины, Пайдугины и Тыма требуется более детальный анализ гидрогеологических условий с учё-

том наблюдаемых региональных изменений режима подземных и поверхностных вод [2, 9, 15, 20, 21] за рамками рассматриваемой работы.

Если говорить о выявленных изменениях величины L_d , то полученные результаты являются аргументом в пользу приведенного в [22] предложения рассматривать границы водосборов не в виде линии, а в виде полосы. Ширина последней может быть ориентировочно определена при уровне значимости 5% в диапазоне от $A(L_d) - 2 \cdot \sigma(L_d)$ до $A(L_d) + 2 \cdot \sigma(L_d)$, где $A(L_d)$, $\sigma(L_d)$ – среднее арифметическое значение и среднее квадратическое отклонение величины L_d , вычисленной по уравнению (3).

В целом указанные факты позволяют сделать вывод о взаимосвязанном функционировании и коэволюции подземных и поверхностных водных объектов. Наличие обширных болотных массивов озёр на водоразделах средних рек (например, озеро Мирное между реками Чузик и Чижалка) в какой-то мере предопределено пространственным положением речной сети, основная часть которой (верхнее и среднее те-

чение средних рек), в свою очередь, формируется при насыщении грунтов и в целом отражает гидрогеологические условия. В частности, неравномерность внутригодового речного стока во многих случаях возникает при затрудненном водообмене между реками и подземными водоносными горизонтами [22].

В свою очередь, неравномерность стока малых рек может приводить к дополнительному заболачиванию в меженный период вследствие сохраняющегося в течение года избыточного увлажнения при затрудненном стоке, которое стимулирует дальнейшее заболачивание водосборов.

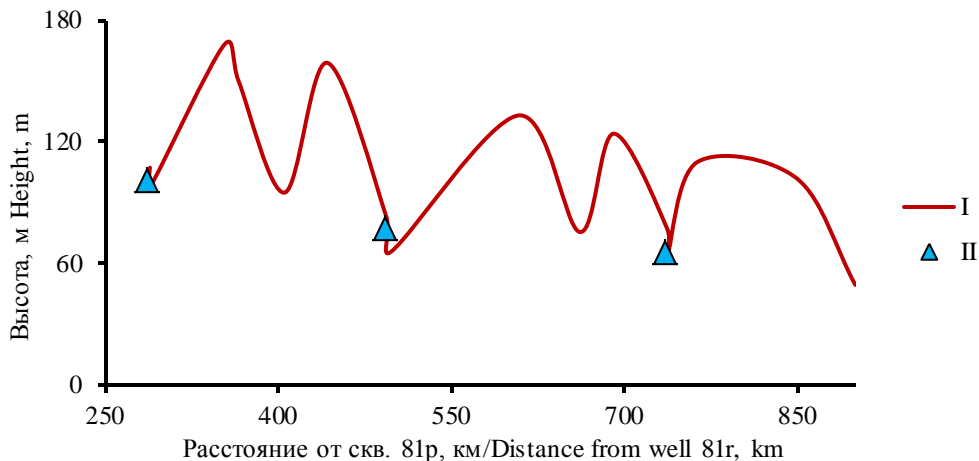


Рис. 6. Схематичный профиль поверхности (I, включая уровни речных вод) и среднемноголетние уровни подземных вод (II: 81р, 113р, 156р) на участке от с. Зырянское до уреза воды р. Вах у с. Ларьяк

Fig. 6. Schematic surface profile (I, including river water levels) and average long-term groundwater levels (II: 81р, 113р, 156р) in the area from the Zyryanskoe village to the water's edge of the Vakh river near the Laryak village

Заключение

В результате обобщения данных многолетних гидрологических и гидрогеологических наблюдений на территории Томской области выполнена оценка величины K_f (отношение инфильтрации к коэффициенту фильтрации) и положения водоразделов для 15 участков, ограниченных урезами рек, между которыми проводятся (проводились ранее) наблюдения на режимной гидрогеологической скважине. Показано, что инфильтрация в целом снижается во время половодья (при допущении менее значительных внутригодовых изменений средних по разрезу коэффициентов фильтрации), причем на водоразделах – дольше и более плавно, чем

в речных долинах. Внутригодовое изменение величины K_f в большинстве случаев обратно пропорционально изменению среднего значения слоя водного стока смежных рек. Выполнена количественная оценка внутригодовых изменений положения водоразделов рек, отличающегося от положения линии наивысших отметок рельефа. С учетом этого граница водосборов должна рассматриваться не как линия, а как полоса, что целесообразно учитывать при разработке гидрогеологических и гидрологических прогнозов, проведении инженерных изысканий для строительства.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 23-27-00039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мысливец В.И. Преобразования глобального рельефа // Современные глобальные изменения природной среды. В 2-х т. Т. 1. – М.: Научный мир, 2006. – С. 615–626.
- Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. Научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. – СПб: ООО «РИАЛ», 2021. – 190 с.
- Future trajectory of Arctic system evolution / K. Saito, J. Walsh, A. Bring, R. Brown, A. Shiklomanov, D. Yang // Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems / ed. by D. Yang, D.L. Kane. – Switzerland: Springer Nature, 2021. – P. 893–914. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9_30.
- Третьяков М.В., Шикломанов А.И. Оценка влияния на гидрологические процессы в Обской губе климатических и антропогенных изменений на ее водосборе // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49. – № 5. – С. 608–624. DOI: 10.31857/S0321059622050169.
- Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слукса, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
- Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – V. 190 – P. 315–341.
- Deng Zh., Zhang Ya. Discussion on hydrogeology and environmental geology work under the view of sustainable development // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2nd International Conference on Air Pollution and Environmental Engineering. – 2020. – V. 450. – 012121. – P. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/450/1/012121.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 408 с.
- Льготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения среднесезонных и среднегодовых уровней и температуры подземных вод в верхней гидродинамической зоны в Томской области // Геожология. – 2010. – № 1. – С. 23–29.
- Гидрогеология СССР. Т. 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / под ред. В.А. Нуднера. – М.: Недра, 1970. – 368 с.

11. Ресурсы пресных и маломинерализованных подземных вод южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна / отв. ред. Е.В. Пиннекер. – М.: Наука, 1991. – 262 с.
12. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество ежегодное издание. 2020 год. – СПб: Росгидромет, 2021. – 153 с.
13. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2020 г. Информационный бюллетень, выпуск 17. – Томск: филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», 2021. – 194 с.
14. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2021 г. Информационный бюллетень, выпуск 18. – Томск: филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», 2022. – 204 с.
15. Savichev O., Moiseeva J., Guseva N. Changes in the groundwater levels and regimes in the taiga zone of Western Siberia as a result of global warming // Theoretical and Applied Climatology. – 2022. – V. 147 (3–4). – P. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00704-021-03879-4.
16. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. – М.: КДУ, 2009. – 334 с.
17. Hendriks M.R. Introduction to Physical Hydrology. – Oxford, New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
18. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
19. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
20. Ковалевский В.С. Режим подземных вод и его изменения // Современные изменения глобальной природной среды. В 2-х т. Т. I. – М.: Научный мир, 2006. – С. 439–481.
21. River freshwater flux to the Arctic Ocean / A. Shiklomanov, S. Déry, M. Tretiakov, D. Yang, D. Magritsky, A. Georgiadi, W. Tan // Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems / ed. by D. Yang, D.L. Kane. – Switzerland: Springer Nature, 2021. – P. 703–735. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9_24
22. Савичев О.Г. Гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2021. – 167 с.

Поступила: 25.12.2022 г.

Дата рецензирования: 25.01.2023 г.

Информация об авторах

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лобурь Я.Н., магистрант отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314.6(282.256.1)

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF RELATIONS OF RIVER AND GROUND WATER IN THE MIDDLE OB BASIN (WESTERN SIBERIA)

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Yana N. Lobur¹,
ynl5@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Knowledge of the mechanisms and patterns of changes in groundwater flow, the conditions for the interaction of groundwater, river and swamp waters of the Ob river basin, including the Tomsk region, is necessary to predict changes in the region's water resources and plan measures for their integrated use and protection.

The aim of the research is quantitative assessment of the interrelations of river and groundwater in the Middle Ob river (Tomsk region) based on the results of determining the ratio of infiltration to the filtration coefficient and the position of groundwater levels on river watersheds.

Methods: statistical methods, methods of mathematical modeling.

Results and conclusions. The data of long-term hydrological (22 posts on the Ob river and its tributaries) and hydrogeological (14 hydrogeological wells) observations on the territory of the Tomsk region for the period from the 1960s till 2005–2015 were analyzed. It is shown that infiltration generally decreases during floods, and on watersheds it decreases longer and more smoothly than in river valleys. The intra-annual change in the ratio of infiltration to hydraulic conditions in most cases is inversely proportional to the change in the average value of the water flow layer of adjacent rivers. A quantitative assessment of intra-annual changes in the position of river watersheds was made. The most significant changes were found on the border between the rivers: Ob and Vasyugan (well 124p), Ob and Shegarka (63p), Chulym and Kiya (81p). It is concluded that the catchment boundary should be considered not as a line, but as a strip. Quantitative confirmations of regional ground runoff were obtained not only along the rivers, but also in the meridional direction (approximately from south to north).

Key words:

ground and river waters, the Middle Ob river, infiltration ratio to hydraulic conditions, water level regime.

The research was carried out using the RSF grant (project no. 23-27-00039).

REFERENCES

- Myslivets V.I. Preobrazovaniya globalnogo relyefa [Transformations of the global relief]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes natural environment]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2006. Vol. 1, pp. 615–626.
- Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiyskoy Federatsii [Long-term fluctuations and variability of water resources and main characteristics of river runoff in the Russian Federation]. Scientific and applied reference book. Ed. by V.Y. Georgievsky. St. Petersburg, LLC «RIAL» Publ., 2021. 190 p.
- Saito K., Walsh J., Bring A., Brown R., Shiklomanov A., Yang D. Future Trajectory of Arctic System Evolution. In: *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*. Eds. D. Yang, D.L. Kane. Switzerland, Springer Nature, 2021. pp. 893–914. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9_30.
- Tretyakov M.V., Shiklomanov A.I. Assessment of the impact on hydrological processes in the Gulf of Ob of climatic and anthropogenic changes in its catchment area. *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 5, p. 608–624. In Rus. DOI: 10.31857/S0321059622050169.
- Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p.
- Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. Vol. 190, pp. 315–341.
- Deng Zh., Zhang Ya. Discussion on hydrogeology and environmental geology work under the view of sustainable development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2nd International Conference on Air Pollution and Environmental Engineering, 2020, 450, 012121, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/450/1/012121.
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 15. Altay i Zapadnaya Sibir. Vyp. 2. Srednyaya Ob* [Surface water resources of the USSR. Vol. 15. Altai and Western Siberia. Iss. 2. Middle Ob]. Ed. by O.N. Panin. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. 408 p.
- Lgotin V.A., Savichev O.G., Makushin Yu.V. Long-term changes in the average seasonal and average annual levels and temperature of groundwater in the upper hydrodynamic zone in the Tomsk region. *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2010, no. 1, pp. 23–29. In Rus.
- Gidrogeologiya SSSR* [Hydrogeology of the USSR]. T. 16. Zapadno-Sibirskaya ravnina (Nyuenskaya, Omskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti) [Vol. 16. The West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)]. Ed. by V.A. Nudner. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p.
- Resursy presnykh i malomineralizovannykh podzemnykh vod yuzhnoy chasti Zapadno-Sibirskogo artezijskogo basseyna* [Resources of fresh and low-mineralized groundwater in the southern part of the West Siberian artesian basin]. Ed. by E.V. Pinneker. Moscow, Nauka Publ., 1991. 262 p.
- Vodny kadastr. Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispolzovanie i kachestvo. 2020 god* [Water cadastre. Surface and groundwater resources, their use and quality. 2020 year]. St. Petersburg, Roshydromet Publ., 2021. 153 p.
- Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2020 g. Informatsionnyy byulleten* [Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2020. Informational bulletin]. Vol. 17. Tomsk,

- Filial «Sibirskiy regionalny tsentr GMSN», FGBU «Gidropetsgeologiya» Publ., 2021. 194 p.
14. *Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2021 g. Informatsionny byulleten* [Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2021. Informational bulletin]. Vol. 18. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalny tsentr GMSN», FGBU «Gidropetsgeologiya» Publ., 2022. 204 p.
 15. Savichev O., Moiseeva J., Guseva N. Changes in the ground water levels and regimes in the taiga zone of Western Siberia as a result of global warming. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, vol. 147 (3–4), pp. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00704-021-03879-4.
 16. Shestakov V.M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2009. 334 p.
 17. Hendriks M.R. *Introduction to physical hydrology*. Oxford; New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
 18. SP 33-101-2003. *Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
 19. Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2nd ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
 20. Kovalevsky V.S. Rezhim podzemnykh vod i ego izmeneniya [Groundwater regime and its changes]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes natural environment]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2006. Vol. 1, pp. 439–481.
 21. Shiklomanov A., Déry S., Tretiakov M., Yang D., Magritsky D., Georgiadi A., Tan W. River freshwater flux to the Arctic Ocean. *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*. Eds. D. Yang, D.L. Kane. Switzerland, Springer Nature, 2021. pp. 703–735. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9_24.
 22. Savichev O.G. *Gidroekologicheskoe obosnovanie vodokhozyaystvennykh resheniy* [Hydroecological substantiation of water management decisions]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2021. 167 p.

Received: 25 December 2022.

Reviewed: 25 January 2023.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yana N. Lobur, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.