

УДК 556.314.6(282.256.1)  
DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5044  
Шифр специальности ВАК: 1.6.4, 1.6.6, 1.6.21  
Научная статья

## Оценка притока подземных вод в Среднюю Обь и ее основные притоки

О.Г. Савичев✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ osavichev@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность* определяется необходимостью более точной, по сравнению с используемыми способами, оценки подземной составляющей речного стока как основы для оценки ресурсов подземных вод и решения ряда гидроэкологических задач. *Цель:* разработка методики и собственно оценка подземной составляющей речного стока реки Оби на участке ее среднего течения с использованием гидрогеологических и гидрологических данных. *Методы:* методы математического моделирования, статистические методы. *Результаты и выводы.* На основе анализа гидрогеологических и гидрологических материалов за условно однородный период 1995–2015 гг. разработана методика оценки подземной составляющей речного стока в пределах Западно-Сибирской равнины по данным о среднемесячных расходах и уровнях речных вод в зимнюю межень и уровнях подземных вод (в зоне активного водообмена). Методика максимально адаптирована к требованиям действующего Российского законодательства, включает в себя анализ гидрогеохимического баланса и определение методами математической статистики и оптимизации параметров, которые соответствуют коэффициенту фильтрации и удельному притоку подземных вод. Методика апробирована на примере Оби и крупных притоков на участке ее среднего течения. Установлено, что в большинстве случаев средние и большие реки в пределах речных долин в целом характеризуются преобладанием нисходящего режима взаимодействия речных и подземных вод, а нижний предел определения подземной составляющей речного стока в первом приближении может быть рассчитан по речному гидрографу с использованием линейной интерполяции между стоком в марте и декабре. Показано, что гидрогеологические условия ранее (в верхнем меле и палеогене) могли способствовать (и способствуют в настоящее время) аккумуляции соединений железа в верхней гидродинамической зоне.

**Ключевые слова:** методика оценки, подземная составляющая речного стока, уровни подземных вод, Западная Сибирь, таежная зона

**Для цитирования:** Савичев О.Г. Оценка притока подземных вод в Среднюю Обь и ее основные притоки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 144–158. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5044

---

UDC 556.314.6(282.256.1)  
DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5044  
Scientific paper

## Assessment of groundwater inflow into the Middle Ob river and its main tributaries

O.G. Savichev✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ OSavichev@mail.ru

**Abstract. Relevance.** The need for a more accurate assessment of the underground component of river runoff as a basis for assessing groundwater resources and solving a number of hydroecological problems. *Aim.* To develop a methodology and actually assess of the underground component of the Ob river runoff in its middle reaches using hydrogeological and hydrological data.

**Methods.** Mathematical modeling, statistical methods. **Results and conclusions.** Based on the analysis of hydrogeological and hydrological materials for a conditionally homogeneous period of 1995–2015, a methodology has been developed for assessing the underground component of river runoff within the West Siberian Plain using data on average monthly discharges and river water levels in winter low water and groundwater levels (in the zone of active water exchange). The methodology is maximally adapted to the requirements of the current Russian legislation and includes an analysis of the hydrogeochemical balance and the determination of parameters that correspond to the filtration coefficient and specific groundwater inflow using mathematical statistics and optimization methods. The method was tested on the example of the Ob and large tributaries in its middle reaches. It was established that in most cases medium and large rivers are characterized by the prevalence of a descending mode of interaction between river and groundwater in general within river valleys, and the lower limit of determining the underground component of river runoff can be determined using linear interpolation between the flows in March and December. It was shown that hydrogeological conditions previously (in the Upper Cretaceous and Paleogene) could have contributed (and currently contribute) to the accumulation of iron compounds in the upper hydrogeodynamic zone.

**Keywords:** assessment method, underground component of river runoff, groundwater levels, Western Siberia, taiga zone

**For citation:** Savichev O.G. Assessment of groundwater inflow into the Middle Ob and its main tributaries. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 144–158. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5044

## Введение

Количественная оценка подземной составляющей речного стока, которая в первом приближении может рассматриваться как значительная часть подземного стока, является важным элементом сразу нескольких крупных научных и инженерных проблем – от выявления и прогноза долгосрочных изменений состояния окружающей среды и климата и оценки экологического стока до определения ресурсов и запасов подземных вод и условий функционирования подземных и поверхностных водозаборов [1–11]. Это определяет постоянный интерес к разработке методов оценки ресурсов и стока подземных вод, обзор которых достаточно полно представлен в работах [1, 2, 4, 6, 7, 12–20].

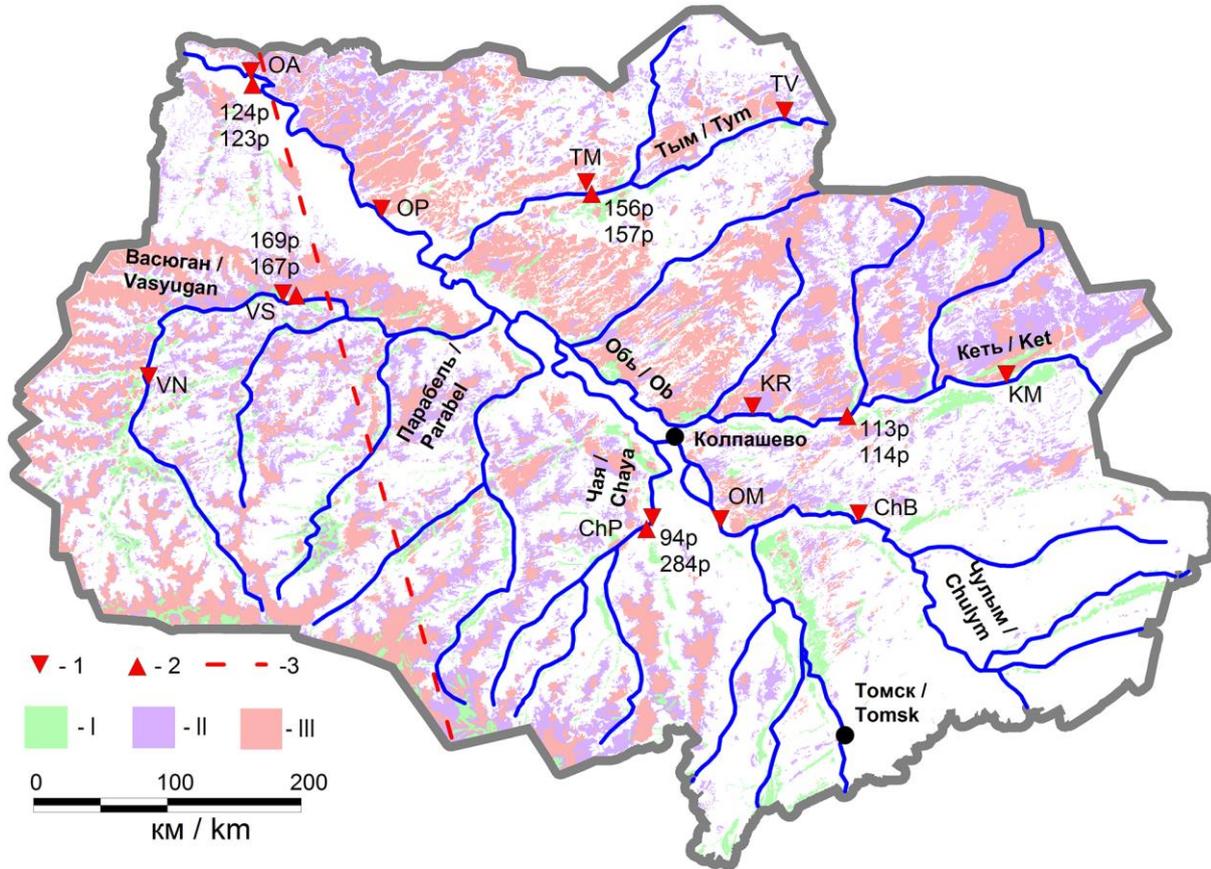
Многие из них сводятся к достаточно формальному расчленению гидрографа реки (в пределах водосбора которой оцениваются ресурсы подземных вод), исходя либо из физических представлений о времени добегания водных масс и истощения ресурсов подземных вод (при отсутствии значимой инфильтрации в зимнюю межень) с учетом геоморфологических условий, либо результатов визуального анализа гидрогеологического разреза и/или сопоставления гидрогеохимических материалов, причем иногда с попыткой анализа сразу нескольких уравнений гидрогеохимического баланса как по условно консервативным, так и по ярко выраженным неконсервативным веществам [21]. Также используются методы гидрогеодинамического моделирования, но в большинстве случаев их эффективность ограничена вследствие целого ряда допущений при определении начальных и граничных условий, например, при задании постоянного среднего минимального расхода и уровня воды в реке [1, 2, 12–16, 22–24].

Предпринимались и попытки использовать материалы наблюдений за уровнями подземных вод [14, 15, 18, 25–27], но до последнего времени не было необходимого понимания, как учитывать по-

ступление в речную сеть подземных вод из водоносных отложений разного возраста, что и определило цели рассматриваемой работы – разработку методики и собственно оценку подземной составляющей речного стока реки Оби на участке среднего течения и ее основных равнинных притоков на основе сопоставления уровней речных и подземных вод. Соответственно этим целям структура исследования включала (задачи исследования): выбор и анализ объектов изучения, разработку математической модели, моделирование подземного стока и анализ полученных результатов.

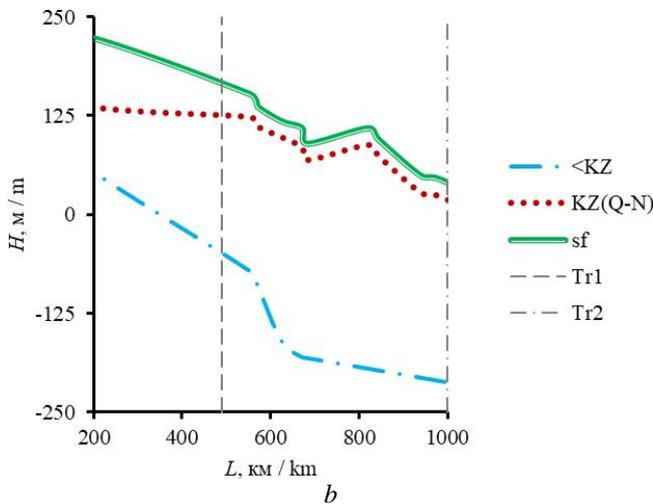
## Объекты и методика исследования

В качестве объектов исследования выбраны участки водосборов р. Оби у с. Александровское и ее притоков – рр. Тым (у с. Напас), Кеть (у пос. Белый Яр), Васюган (у с. Средний Васюган), Чая (у с. Подгорное), в пределах которых организовано водоснабжение из подземных источников, что определяет постоянную необходимость в достоверной оценке и переоценке ресурсов и запасов подземных вод. Указанные участки расположены в административном отношении в пределах Томской области (рис. 1, табл. 1), с учетом природного районирования – на равнинной таежной территории (в подзонах средней и южной тайги), и в первом приближении представляют собой поперечные профили водосборов, в пределах которых имеются гидрологические посты Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации (Росгидромета; ранее – Госкомгидромета СССР) и режимные гидрогеологические скважины Сибирского регионального центра Федерального государственного бюджетного учреждения (СРЦ ФГБУ) «Гидроспецгеология (ранее на рассматриваемой территории – АО «Томскгеомониторинг», ОГУП Территориальный центр Томскгеомониторинг», Томская геолого-разведочная экспедиция).



a

**Рис. 1.** Схема размещения участков исследования (a) и схематичный разрез по профилю от с. Ребриха в Алтайском крае до г. Стрежевой (b); скважина примерно на границе Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа); условные обозначения: 1 – пункты гидрологических наблюдений; 2 – пункты гидрогеологических наблюдений; обозначения пунктов и номера скважин приведены в табл. 1; 3 – положение схематического разреза (b); типы болот: I – низинные; II – переходные; III – верховые; <KZ – отметка кровли отложений допалеогенового возраста; KZ – отметка кровли отложений палеогенового возраста; sf – отметка поверхности, м БС; Tr1 и Tr2 – южная и северная границы Томской области; схематический разрез построен по данным [27, 30–32, 34, 36, 37]; H – высотная отметка; L – расстояние от условного начала (граница выхода палеозойских отложений [31])



b

**Fig. 1.** Layout of study sites (a) and schematic cross-section along the profile from the village of Rebrikha in the Altai Territory to the town of Strezhevoy (b); legend: 1 – hydrological observation points; 2 – hydrogeological observation points; point designations and well numbers are given in Table 1; 3 – position of schematic cross-section (b); types of bogs: I – lowland; II – transitional; III – upland; <KZ – underpaleogene deposit roof mark; KZ – Paleogene deposit roof mark; sf – surface mark, m BS; Tr1 and Tr2 are the southern and northern borders of Tomsk region; the schematic section is constructed according to the data of [27, 30–32, 34, 36, 37]; H is the elevation; L is the distance from the conventional beginning (boundary of the outcrop of Paleozoic deposits [31])

Основные допущения (с учетом алгоритмов построения гидрогеологических моделей, согласно [16, 28]) при гидрогеологической схематизации заключаются в следующем:

1) непосредственные взаимодействия речных и подземных вод в значительной мере ограничены водоносными отложениями неоген-четвертичного и палеогенового возраста; в соответствии с по-

ложениями [29], к отложениям неоген-четвертичного возраста приурочен первый водоносный горизонт, к отложениям палеогена – второй и иные горизонты; по условиям залегания [4] в первом случае – грунтовые воды, в остальных – артезианские; взаимодействие речных вод с подземными водами в отложениях мезозоя минимальны и/или выражаются опосредованно через формирование ресурсов и химического состава напорных вод в отложениях палеогена;

- 2) первый и последующие (второй и иные, согласно терминологии [29]) водоносные горизонты отличаются друг от друга по фильтрационным свойствам и химическому составу вод, но между ними нет непрерывного по площади водоупора, вследствие чего допустимо выделение двух групп горизонтов (первая группа – первый горизонт; вторая группа – второй и иные горизонты) и использование в каждом случае уравнения Дюпюи [15, 28]; отсутствие сплошного водо-

упора между водоносными горизонтами и соответствующие различия между характеристиками подземных вод двух групп в целом подтверждаются материалами обобщений гидрогеологических исследований [30–39];

- 3) при рассмотрении среднесезонного водного баланса территории изменение влагозапасов водосбора существенно не превышает погрешность определения, а годовые значения подземной составляющей примерно равны сумме значений инфильтрации и разницы притока и оттока подземных вод к расчетному профилю.

С учетом наличия данных наблюдений и указанных выше допущений рассмотрен статистически однородный период с середины 1990-х до середины 2010-х гг. Исходная информация – ранее опубликованные (в части исследования многолетних изменений режима подземных вод) материалы СРЦ ФГБУ «Гидроспецгеология» и Росгидромета [26, 27, 37, 39].

**Таблица 1.** Сведения об изученных пунктах гидрологических и гидрогеологических наблюдений (выборка данных [26, 27, 38, 39])

**Table 1.** Information on the studied hydrological and hydrogeological observation points (data sample from [26, 27, 38, 39])

| Подземные воды<br>Groundwater         |                  |   | Река 1, створ<br>River 1, section |  |                   | Дополнительный<br>створ на реке 1<br>Extra section on<br>the river 1 | Река 2, створ<br>River 2, section                                 |  |                   |
|---------------------------------------|------------------|---|-----------------------------------|--|-------------------|--|---|--|-------------------|
| Пункт<br>Point                        | Скважина<br>Well | Отложения<br>Deposits                                 | $H_{gr(x)}$ ,<br>м/м              | Наименование<br>Name                                   | $H_{r1}$ ,<br>м/м |  | $Q_{r1}$ , м <sup>3</sup> /с<br>m <sup>3</sup> /s                 | Наименование<br>Name   | $H_{r2}$ ,<br>м/м |
| с. Александровское<br>Aleksandrovskoe | 124р             | 1Q <sub>III</sub>                                     | 38,42                             | Обь у с. Александровское<br>Ob at Aleksandrovskoe (OA) | 35,81             | 4882   | Обь у с. Прохоркино<br>Ob at Prokhorkino (OP)                     | Васюган у с. Средний Васюган<br>Vasyugan at Sredny Vasyugan (VS) | 55,54             |
|                                       | 123р             | 1Q <sub>II</sub> *                                    | 39,01                             | OA   | 35,81             | 4882   | OP  | VS   | 55,54             |
| с. Напас<br>Napas                     | 156р             | P <sub>3lg</sub> **                                   | 63,93                             | Тым у с. Напас<br>Tym at Napas (TM)                    | 63,93             | 205  | Тым у п. Ванжил-Кынак<br>Tym at Vanzhil-Kynak (TV)                | Кеть у с. Родионово<br>Ket at Rodionov (KR)                      | 61,57             |
|                                       | 157р             | P <sub>1pr</sub>                                      | 77,00                             | TM   | 63,93             | 205  | TV  | KR   | 61,57             |
| с. Белый Яр<br>Bely Yar               | 113р             | 2aQ <sub>III</sub> +Q <sub>II</sub> tb+N <sub>1</sub> | 76,68                             | Кеть у п. Белый Яр<br>Ket at Bely Yar (KB)             | 72,06             | 378  | Кеть у п. Максимкин Яр<br>Ket at Maksimkin Yar (KM)               | Чулым у с. Батурино<br>Chulym at Baturino (ChB)                  | 75,41             |
|                                       | 114р             | P <sub>3lg</sub>                                      | 77,09                             | KB   | 72,06             | 378  | KM  | ChB  | 75,41             |
| с. Средний Васюган<br>Sredny Vasyugan | 169р             | Q <sub>II</sub> tb+2Q <sub>III</sub> tb               | 60,08                             | VS   | 55,54             | 171  | Васюган у п. Новый Васюган<br>Vasyugan at Novy Vasyugan (VN)      | OA   | 35,81             |
|                                       | 167р             | P <sub>2-3tv</sub>                                    | 61,06                             | VS   | 55,54             | 171  | VN  | OA   | 35,81             |
| с. Подгорное<br>Podgorное             | 94р              | 1Q <sub>III</sub>                                     | 64,88                             | Чая у с. Подгорное<br>Chaya at Podgorное (ChP)         | 63,50             | 93   | Чая у устья р. Икса<br>Chaya at the mouth of the Iksa river (ChI) | Обь у с. Могочино<br>Ob at Mogochino (OM)                        | 60,19             |
|                                       | 284р             | P <sub>2jr</sub> +P <sub>3nm</sub> ***                | 75,24                             | ChP  | 63,50             | 93   | ChI   | OM   | 60,19             |

Примечание: возможен приток из отложений: \* палеогена P<sub>3(at+nm)</sub>; \*\* аллювиальных современных aQ; \*\*\* меловых K; H<sub>gr(x)</sub> – уровень подземных вод в скважине на расстоянии x от реки 1; H<sub>r1</sub> и Q<sub>r1</sub> – среднесезонный уровень и расход воды реки 1; H<sub>r2</sub> – среднемесячный уровень воды реки 2.

Note: possible inflow from deposits: \* Paleogene P<sub>3(at+nm)</sub>; \*\* modern alluvial aQ; \*\*\* Cretaceous K; H<sub>gr(x)</sub> is groundwater level in the well at a distance x from the river 1; H<sub>r1</sub> and Q<sub>r1</sub> are average monthly water level and discharge of the river 1; H<sub>r2</sub> is an annual water level of the river 2.

Итеративный подбор структуры математической модели для оценки подземного стока представляет собой непосредственно одну из задач исследования. Поэтому структура модели изложена ниже в соответствующем разделе. Здесь лишь отметим, что параметры модели определялись методом наименьших квадратов (МНК) при условии (1) и уровне значимости 5 %, а также в результате поиска решения нелинейных задач методом общего понижающего градиента с использованием критериев (2), (3):

$$R^2 > 0,36; \frac{|r|}{\delta_r} \geq 2; \frac{|k_r|}{\delta_k} \geq 2, \delta_r \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (1)$$

$$Kr_1 = \min \frac{\sqrt{\frac{(y_o - y_m)^2}{N-1}}}{\sigma_o} \leq 0,8, \quad (2)$$

$$Kr_2 = \min \frac{|y_o - y_m|}{y_o}, \quad (3)$$

где  $N$  – объем выборки;  $R^2$  – квадрат корреляционного отношения;  $r$  и  $\delta_r$  – коэффициент корреляции и погрешность его определения;  $k_r$  и  $\delta_k$  – коэффициент регрессии и погрешность его определения [40];  $y_o$  и  $y_m$  – наблюдаемые и вычисленные значения величины  $y$ ;  $\sigma_o$  – среднее квадратическое отклонение величины  $y_o$ ; критерий  $Kr(1)$  представляет собой функцию критерия Нэша–Сатклифа [41], обычно используемую в практике гидрологических прогнозов в Российской Федерации [13]. Все расчеты выполнены в среде MS Excel.

### Структура модели

С учетом указанных выше допущений приток подземных вод в речную сеть на равнинной таежной части Западной Сибири ориентировочно составляет основную часть общего подземного стока в зоне активного водообмена в пределах кайнозойских отложений в зимнюю межень, когда роль инфильтрации после выпадения дождей и оттепелей ориентировочно находится в пределах погрешности определения. Тогда подземная составляющая речного стока в зимнюю межень  $q_{gr,w}$  примерно равна удельному (по поперечному профилю) речному стоку  $q_{r,w}$  ( $m^2/c$ ) и суммарному притоку подземных вод из водоносных отложений неоген-четвертичного  $q_{Q,w}$  и палеогенового  $q_{P,w}$  возраста и может быть рассчитана по уравнению (4), сток растворенных солей  $G_{r,w}$  ( $\Gamma/(m \cdot c)$ ) – по уравнению (5), а доля притока из различных горизонтов (6) – путем решения уравнений (4, 5):

$$q_{r,w} \approx q_{gr,w} = q_{gr,Q,w} + q_{gr,P,w}, \quad (4)$$

$$G_{r,w} \approx Q_{r,w} S_{r,w} \approx q_{gr,Q,w} S_{gr,Q} + q_{gr,P,w} S_{gr,P}, \quad (5)$$

$$\beta_j = \frac{q_{j,w}}{Q_{r,w}}, \quad (6)$$

примечание: фактически рассматривается сток главных ионов  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ; сумма главных ионов

$$S = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+] + [K^+] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] + [SO_4^{2-}] + [Cl^-], \Gamma/m^3.$$

Еще одно допущение – приток подземных вод из первого или остальных водоносных горизонтов с одного из двух берегов реки определяется уравнением Дюпюи (7), где поступление вод в горизонт извне  $W$  ( $m/c$ ; сумма инфильтрации  $Inf$  и разницы между притоком и оттоком подземных вод к профилю  $q_{gr}$  (8)) рассчитывается по соотношению среднемесячных уровней речных вод смежных рек ( $H_{r1}$  и  $H_{r2}$  в м Балтийской системы высот (БС);  $L_{12}$  – расстояние между смежными пунктами наблюдений на реках 1 и 2, м) и подземных вод  $H_{gr(x)}$  (в м БС) на расстоянии  $x$  от пункта 1 (9):

$$q_{1,j,i} = \frac{K_{f,i}}{2x} (H_{r1,j,i}^2 - H_{gr(x),j,i}^2) - \frac{W_{j,i}x}{2}, \quad (7)$$

$$W_{j,i} = Inf_{j,i} + q_{gr,j,i}, \quad (8)$$

$$\gamma_{j,i} = \frac{W_{j,i}}{K_{f,j,i}} = \frac{H_{gr(x),j,i}^2 - H_{r1,j,i}^2}{(L_{12,i} - x)x} + \frac{H_{r1,j,i}^2 - H_{r2,j,i}^2}{(L_{12,i} - x)L_{12,i}}, \quad (9)$$

где  $K_f$  – осредненное по профилю значение коэффициента фильтрации,  $m/c$ ;  $i$  – индекс берега (левый, правый);  $j$  – индекс возраста водоносных отложений (первый водоносный горизонт в отложениях неоген-четвертичного возраста N-Q; второй и прочие водоносные горизонты – в отложениях палеогена P). Тогда суммарный приток подземных вод из отложений  $j$  к реке 1 описывается уравнением (10), которое может рассматриваться как уравнение регрессии, параметры которого определяются методом наименьших квадратов для периода зимней межени в предположении того, что в остальную часть года параметры  $b_{q^*}$  и  $K_{f^*}$  (10) остаются постоянными в течение всего года. При этом суммарный приток подземных вод из первого (в отложениях неоген-четвертичного возраста) и иных (ориентировочно – в отложениях палеогенового возраста) горизонтов оценивается по уравнениям (10)–(12):

$$q_{1,j} = q_{1,j,lf} + q_{1,j,rt} \approx 2q_{1,j,i} + b_q = b_{q,j^*} - K_{f,j^*} \left( \frac{(H_{gr(x),j,i}^2 - H_{r1,j,i}^2)}{x} - \gamma_{j,i}x \right) \approx \beta_j Q_{r,w}, \quad (10)$$

$$q_1 = q_{1,N-Q} + q_{1,P}, \quad (11)$$

$$W_1 = W_{1,N-Q} + W_{1,P}, \quad (12)$$

$$K_{f1} = \frac{1}{\frac{W_{1,N-Q}}{W_1} \frac{1}{K_{f,N-Q}} + \frac{W_{1,P}}{W_1} \frac{1}{K_{f,P}}}, \quad (13)$$

где  $b_q$  – функция разницы между инфильтрацией и притоком-оттоком подземных вод к расчетному профилю в русло реки 1 с левого и правого берегов;  $b_{q*}$  и  $K_{f*}$  – параметры, соответствующие коэффициентам регрессии и характеризующие математическое ожидание величин  $b_q$  и  $K_f$  по всему поперечному профилю и на левом, и на правом берегах реки 1. Уравнение (12) применимо при условии, что часть влаги, поступающей в неоген-четвертичные отложения, участвует преимущественно в формировании режима грунтовых вод (первый водоносный горизонт), а часть поступает в отложения палеогена и оказывает влияние на режим в основном только соответствующих подземных вод; коэффициент фильтрации  $K_{f1}$  (13) представляет собой взвешенное по объемам водопитока значение для зоны активного водообмена в целом. Параметры модели (10)–(13) первоначально определяются для месяцев зимней межени (в случае рассматриваемой территории – с декабря по март [42]) методом наименьших квадратов с учетом условия (1), затем уточняются в результате подбора по критерию  $Kr_3$  (14) и распространяются на весь год:

$$Kr_3 = 0,25Kr_1(q;4) + 0,75Kr_2(Inf;12), \quad (14)$$

где  $Kr_1(q;4)$  – значение критерия  $Kr_1$  (2) при расчете удельного притока подземных вод по уравнению (7);  $Kr_2(Inf;12)$  – значение критерия  $Kr_2$  (3) при расчете инфильтрации по уравнению (9) с учетом умножения отношения  $\gamma$  на расчетный коэффициент фильтрации  $K_f$  и равенства готовых значений подземного стока и величины  $W$  в среднем за многолетний (однородный) период; взвешивающие коэффициенты получены как  $4/(4+12)=0,25$  и  $1-0,25=0,75$ , где 4 – объем выборки для расчета  $Kr_1(q;4)$ , а 12 – для расчета  $Kr_2(Inf;12)$ .

Необходимо отметить, что по модели подземного стока (9)–(11) можно косвенно оценить общее поступление влаги в водоносные горизонты (по крайней мере, в пределах верхней части гидрогеологического разреза в диапазоне от поверхности до подошвы водоносных отложений палеогена) иначе, чем это предлагается в работах [6, 7, 12, 13, 15, 16, 42–45]. Предположим, что инфильтрация  $Inf$  определяется согласно Грину и Эмптону, а суммарный приток-отток подземных вод к расчетному профилю – по уравнению Дарси [3, 12, 13, 15, 43, 44]. Тогда выражение (8) для месяца  $t$  с учетом некоторых упрощений приобретает вид (15), а параметры  $h_{gr*}$  (среднее взвешенное значение глубины подземных вод) и  $H_{ef}$  (эффективное увлажнение, мм/мес) оцениваются по уравнениям (16)–(22):

$$W_t = k_t k_w \left( 1 + \frac{H_{ef*,t}}{h_{gr*,t}} \right) + m_f (H_{r1,t} - H_{r2,t}) \frac{x}{L_{12}} + W_0, \quad (15)$$

$$h_{gr*,t} = \beta_{N-Q} h_{grN-Q,t} + \beta_P h_{grP,t}, \quad (16)$$

$$H_{ef,t} = P_{r,t} + h_{sm,t} - E_{op,t}, \quad (17)$$

$$h_{sm,t} = \begin{cases} a, & a > 0, \\ 0, & a \leq 0, \end{cases} \quad (18)$$

$$a = Sn_{t-1} - Sn_t,$$

$$Sn_t = \begin{cases} b, & b > 0, \\ 0, & b \leq 0, \end{cases} \quad (19)$$

$$b = Sn_{t-1} + P_{sn,t} - E_{sn,t} - h_{snp,t},$$

$$h_{snp,t} = k_{sn} T_{a,t} N_{m,t}, \quad (20)$$

$$E_{sn,t} = k_{esn} d_{a,t} N_{m,t}, \quad (21)$$

$$E_{op,t} = k_{Eop} (P_{r,t} - Y_{r1-01,t} - E_{sn,t}) \frac{d_{a,t}}{\sum_1^{12} d_{a,t}}, \quad (22)$$

где  $Inf$  – средняя по профилю инфильтрация в водоносные горизонты, из которых подземные воды поступают в реку 1, мм/мес;  $k_t$  – коэффициент размерности;  $m_f$  и  $W_0$  – параметры зависимости притока-оттока подземных вод к расчетному профилю с учетом коэффициента водопроводимости и различий право- и левобережной частей относительно створа на реке 1;  $k_w$  – среднее значение коэффициента влагопроводности по профилю;  $H_{r1}$  и  $H_{r2}$  – среднемесячные уровни смежных рек 1 и 2 (в м БС) в створах, расположенных на расстоянии  $L_{12}$ ;  $h_{gr*}$  – средневзвешенная глубина подземных вод (по глубинам в отложениях неоген-четвертичного и палеогенового возраста, м БС);  $\beta_Q$  и  $\beta_P$  – доля подземных вод из отложений неоген-четвертичного и палеогенового возраста в суммарном подземном стоке (6);  $P_r$  и  $P_{sn}$  – атмосферные осадки в жидком и твердом виде;  $E_{op}$  и  $E_{sn}$  – среднемесячное испарение с поверхности водосбора в теплый и холодный периоды, мм/мес;  $Sn$  – влагозапасы в снежном покрове, мм;  $h_{snp}$  и  $h_{sm}$  – потенциальное снеготаяние и фактическая водоотдача из снежного покрова, мм/мес;  $T_a$  (°C) и  $d_a$  (гПа) – среднемесячные значения температуры и дефицита влажности атмосферного воздуха;  $Y_{r1-01}$  – среднемесячный слой стока по профилю (разница слоев стока в створах 1 и 01), мм/мес;  $N_m$  – количество суток в месяце  $t$ ;  $k_{sn}$  – коэффициент стаивания (начальное значение 5 мм/(°C·сут), принятое согласно [13], уточнялось подбором по критерию (3)), мм/(°C·сут);  $k_{esn}$  – коэффициент пропорциональности, принятый равным 0,37 согласно [45];  $k_{Eop}$  – коэффициент пропорциональности, определяемый подбором для уравнения водного баланса по критерию (3).

Исходная гидрометеорологическая информация для модели (15)–(22) принята по данным Росгидромета и Томского политехнического университета, нормативным и нормативно-методическим документам Министерств природных ресурсов и экологии (включая Росгидромет) и строительства и жилищно-коммунального хозяйства России [46–49], а также опубликованным ранее работам [26, 27, 38, 39]. Для пунктов у сел Александровское, Напас и Средний Васюган были использованы данные непосредственно по соответствующим метеостанциям, а для прочих пунктов – как среднее взвешенное (23) по ближайшим метеостанциям по расчетному профилю: у п. Белый Яр – между метеостанциями г. Колпашево и п. Усть-Озерное; у с. Подгорное – между с. Бакчар и г. Колпашево:

$$\Phi_x = \frac{\frac{\Phi_k + \Phi_{k+1}}{L_{k,x} + L_{k+1,x}}}{\frac{1}{L_{k,x}} + \frac{1}{L_{k+1,x}}}, \quad (23)$$

где  $\Phi$  – метеопараметр по данным метеостанций  $k$  и  $k+1$  и в точке  $x$  между ними;  $L_{k,x}$  – расстояние между метеостанцией  $k$  и точкой  $x$ . Водный сток р. Оби у с. Александровское принят по данным р. Оби у с. Прохоркино с коэффициентом 1,046, сток р. Кети у п. Белый Яр – линейной интерполяцией между створами на р. Кети у п. Максимкин Яр и с. Родионово (по площади водосбора), а уровни воды р. Чай ниже устья р. Иксы – по данным у с. Подгорное с учетом уклона реки.

### Результаты исследования и их обсуждение

Приведенная выше структура модели подземной составляющей стока является результатом апробации различных подходов с учетом следующих требований: 1) блоки математической модели должны максимально соответствовать действующему Российскому законодательству и нормативно-методической базе в области инженерных изысканий, в частности – требованиям [29, 47, 50–52], одновременно соответствуя подходам, закрепленным в международной практике [3, 6, 7, 53]; 2) используется минимальное количество гидрологических, гидрогеологических и климатических параметров, информация о которых приводится в изданиях подразделений Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации; 3) выполняются условие (1) и минимизация значений критериев (2), (3), (14). С учетом этого варианты расчетов (а) подземного стока в целом по водосбору (в замыкающем исследуемом створе), (б) подземного стока по поперечному профилю без учета притока-оттока к расчетному профилю, а также (в) инфильтрации и (г) испарения с поверхности водосборов способами, предложенными в [6, 7, 13, 15, 43–45, 53, 54],

были отклонены вследствие более высоких значений критериев (2), (3), (14), неустойчивости результатов для разных объектов и необходимости привлечения большего количества параметров, включая определяемые методами оптимизации. В то же время необходимо отметить, что модель (4)–(13), (15)–(22) разработана и может применяться для условий таежной равнинной части бассейна Оби и в среднем за период 1995–2015 гг. в разрезе месяцев и года. Ее адаптация к другим природным условиям требует дополнительных исследований.

Собственно параметры полученной модели (4)–(13), (15)–(22) и значения критериев (2), (3), (14) приведены в табл. 2. Они в целом свидетельствуют о возможности практического использования модели для оценки ресурсов подземных вод зоны активного водообмена и условий их использования и охраны, например, на период эксплуатации водозаборов с вариативным заданием параметров (табл. 2).

Анализ результатов моделирования подтвердил ранее полученные выводы [26, 27, 38] о том, что, во-первых, нижняя граница подземной составляющей речного стока  $q_{1*}$  в месяц  $t$  (календарного года) в первом приближении (с учетом погрешности определения около 20 %, табл. 2, рис. 2, 3) может быть оценена по уравнению (24), существенно облегчающему расчеты стока и ресурсов подземных вод в пределах таежной зоны Западно-Сибирской равнины:

$$q_{1*,t} = \begin{cases} Q_{r,t}, & t = 1, 2, 3, 12; \\ Q_{r,3} + (Q_{r,12} - Q_{r,3}) \frac{(t-3)}{(12-3)}, & 3 < t < 12, \end{cases} \quad (24)$$

где  $Q_{r,t}$  – среднемесячный расход реки 1 в месяц  $t$  календарного года (3 – март; 12 – декабрь). Наибольшие отклонения значений подземного стока, вычисленного по уравнениям (4)–(13), по сравнению со способом (24), отмечены для р. Васюган. Этот факт, вероятно, объясняется конфигурацией водосбора реки, вследствие чего в створе с. Средний Васюган концентрируются подземные потоки, направленные как вдоль русла р. Васюган, так и вдоль его крупного притока – р. Нюрольки (рис. 1, а).

Во-вторых, в среднемноголетнем разрезе (1995–2015 гг.) преобладает подпорный режим взаимодействия речных и подземных вод. Наибольшая, но все же не определяющая, а подчиненная роль подпорного режима выявлена только для р. Чай у с. Подгорное (рис. 2, е, табл. 2). Причем для этого же створа обнаружен существенный приток воды в палеогеновые отложения снизу или по профилю (рис. 4). Подобное явление, но существенно в меньших размерах, выявлено и для р. Оби у с. Александровское (рис. 2, а).

**Таблица 2.** Параметры модели подземной составляющей речного стока и критерии качества расчетов  
**Table 2.** Parameters of the model of the underground component of river flow and criteria for the quality of calculations

| Параметр, единицы измерения<br>(уравнение/пояснение)<br>Parameter, units (equation/explanation)   | Пункт (у реки 1)/Point (near the river 1) |                      |                         |                                       |                           |
|---|---|----------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
|   | с. Александровское<br>Aleksandrovskoe     | с. Напас<br>Napas    | с. Белый Яр<br>Bely Yar | с. Средний Васюган<br>Sredny Vasyugan | с. Подгорное<br>Podgornoe |
| $K_{rQ^*}$ , м/с/м/s (10)   | $1,97 \cdot 10^{-3}$                      | $2,45 \cdot 10^{-1}$ | $8,95 \cdot 10^{-5}$    | $7,24 \cdot 10^{-4}$                  | $8,25 \cdot 10^{-6}$      |
| $b_{Q^*}$ (10)  | $7,49 \cdot 10^{-4}$                      | $1,10 \cdot 10^{-4}$ | $4,15 \cdot 10^{-4}$    | $1,84 \cdot 10^{-4}$                  | $1,62 \cdot 10^{-5}$      |
| $K_{r3,Q}$ (14)   | 0,26                                      | 0,25                 | 0,32                    | 0,13                                  | 0,31                      |
| $K_{rP^*}$ , м/с/м/s (10)   | $1,26 \cdot 10^{-3}$                      | $3,10 \cdot 10^{-5}$ | $1,31 \cdot 10^{-5}$    | $2,19 \cdot 10^{-4}$                  | $-7,42 \cdot 10^{-5}$     |
| $b_{P^*}$ (10)  | $5,75 \cdot 10^{-4}$                      | $3,65 \cdot 10^{-4}$ | $6,60 \cdot 10^{-5}$    | $6,62 \cdot 10^{-4}$                  | $-7,92 \cdot 10^{-4}$     |
| $K_{r3,P}$ (14)   | 0,14                                      | 0,21                 | 0,24                    | 0,03                                  | 8,03                      |
| $K_{r1}$ , м/с/м/s (13)   | $1,60 \cdot 10^{-3}$                      | $7,39 \cdot 10^{-5}$ | $4,95 \cdot 10^{-5}$    | $1,55 \cdot 10^{-4}$                  | $-6,69 \cdot 10^{-5}$     |
| $\beta_Q$ (6)   | 0,60                                      | 0,60                 | 0,85                    | 0,21                                  | 0,11                      |
| $\beta_P$ (6)   | 0,40                                      | 0,40                 | 0,15                    | 0,79                                  | 0,89                      |
| $K_{w1} \cdot 10^9$ , м/с/м/s (15)  | 1,584                                     | 1,851                | 1,504                   | 1,818                                 | -2,912                    |
| $m_f$ , 1/с/1/s (15)  | -35,597                                   | 11,216               | 6,628                   | 34,664                                | -16,722                   |
| $W_0$ , м/с/м/s (15)  | 2,812                                     | 4,822                | 2,434                   | 6,289                                 | -28,972                   |
| $T_{a(a)}$ , °C (20)  | -1,3                                      | -1,5                 | -0,4                    | -0,2                                  | 0,2                       |
| $P_r$ , мм/год/mm/year (22)   | 324,7                                     | 366,9                | 385,0                   | 407,3                                 | 384,5                     |
| $P_{sm}$ , мм/год/mm/year (19)  | 208,7                                     | 266,9                | 157,1                   | 155,5                                 | 134,1                     |
| $h_{sm}$ , мм/год/mm/year (18)  | 148,9                                     | 205,5                | 126,0                   | 123,1                                 | 100,7                     |
| $E_{sm}$ , мм/год/mm/year (21)  | 59,8                                      | 61,4                 | 31,1                    | 32,4                                  | 33,5                      |
| $E_{op}$ , мм/год/mm/year (22)  | 222,0                                     | 300,4                | 361,1                   | 319,1                                 | 367,0                     |
| $Y_{r1-01}$ , мм/год/mm/year (22)   | 251,6                                     | 272,1                | 149,9                   | 211,2                                 | 118,2                     |
| $Y_{gr}$ (подземная составляющая годового речного стока $Y_{r1-01}$ /underground component of annual river flow $Y_{r1-01}$ ), мм/год/mm/year   | 146,1                                     | 116,6                | 73,3                    | 149,8                                 | 53,3                      |
| $Y_{gr}$ , %  | 58,1                                      | 42,9                 | 48,9                    | 70,9                                  | 45,1                      |
| $S_{r,y}$ (средняя годовая минерализация речных вод/total dissolved of substances of annual river flow), мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup> | 154,4                                     | 60,9                 | 102,9                   | 154,6                                 | 377,1                     |
| $\delta_{S_{r,y}}$ (погрешность определения $S_{r,y}$ /error of determination), мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>                          | 8,4                                       | 5,1                  | 7,0                     | 10,1                                  | 35,2                      |
| $S_{r,w}$ , мг/дм <sup>3</sup> (5)  | 252,1                                     | 144,0                | 210,7                   | 367,8                                 | 588,2                     |
| $\delta_{S_{r,w}}$ , мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>   | 20,3                                      | 11,0                 | 4,9                     | 14,1                                  | 51,7                      |
| $S_{r,Q}$ , мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup> (5)  | 183,2                                     | 69,5                 | 137,4                   | 158,5                                 | 357,2                     |
| $\delta_{S_{r,Q}}$ , мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>   | 20,2                                      | 28,4                 | 5,1                     | 60,4                                  | 11,7                      |
| $S_{r,P}$ , мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup> (5)  | 356,9                                     | 257,3                | 619,3                   | 424,0                                 | 618,1                     |
| $\delta_{S_{r,P}}$ , мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>   | 10,6                                      | 7,6                  | 72,9                    | 23,1                                  | 29,5                      |

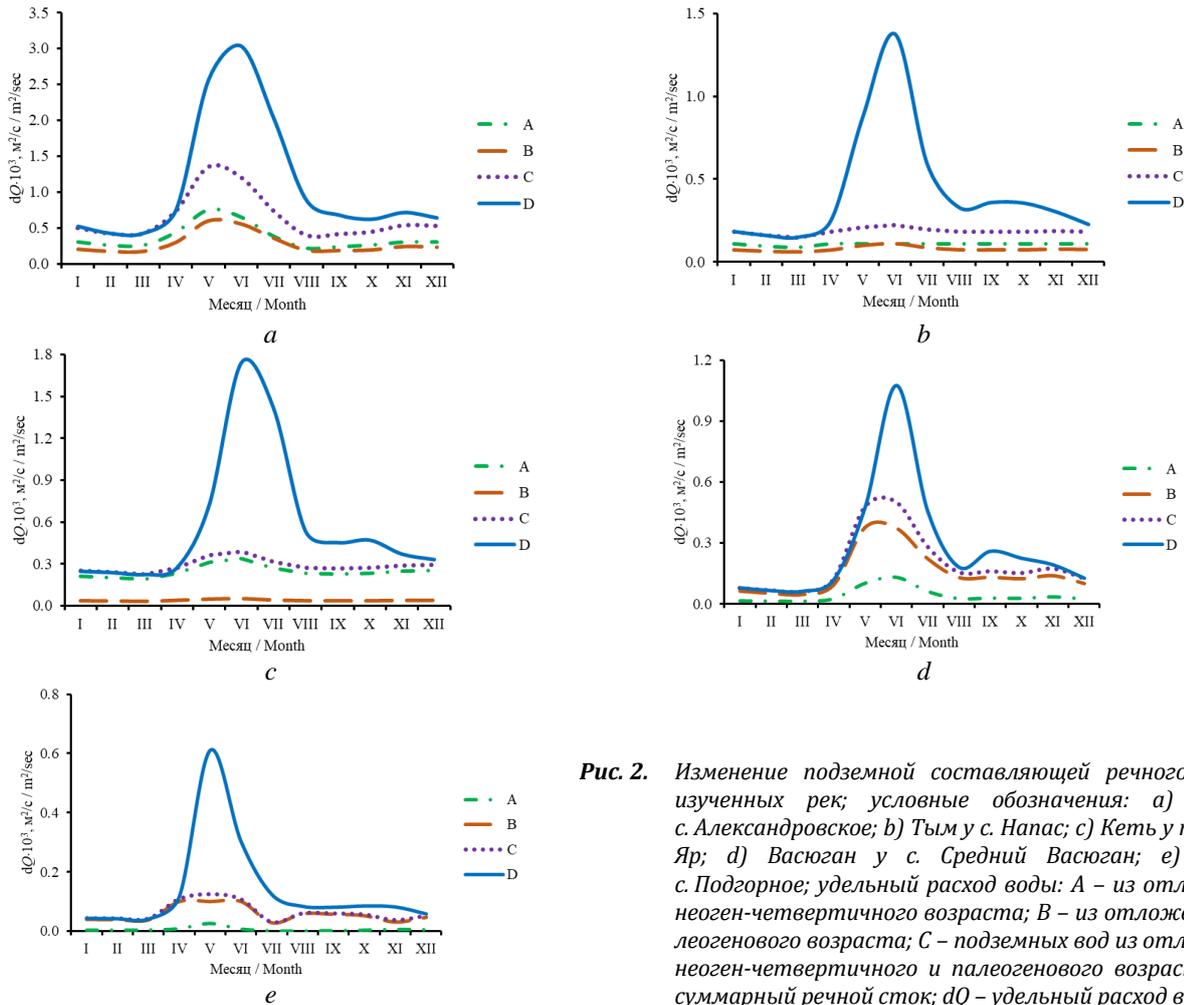
Примечание: погрешность определения среднего арифметического  $A$ :  $\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$   $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение;  $N$  – объем выборки; отрицательное значение коэффициента фильтрации свидетельствует о перетоке в другой водосбор.  
Note: error in determining the arithmetic mean  $A$ :  $\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$   $\sigma$  is standard deviation;  $N$  is the sample size; negative value of the filtration coefficient indicates a flow into another catchment area.

В-третьих, уточненные оценки (табл. 2) в целом совпадают с ранее полученными результатами [26] с учетом использования гидрохимических материалов исследований, выполненных после 2010 г., и привлечения дополнительных материалов по подземным водам в нижнем течении рек Кети и Чаи (по данным у г. Колпашево), Тым (по данным для приобской территории водосбора и на водоразделе с р. Вах) и Васюган (на участке от устья р. Нюрольки до с. Каргасок). Наиболее существенные отклонения отмечены для р. Кети, что, видимо, связано со смещением исследуемого створа от участка среднего течения (п. Максимкин Яр) к нижнему (п. Белый Яр) и, соответственно, изменением условий дренирования водоносных отложений, не исключая, безусловно, и значительной погрешности используемых оценок водного стока и

содержания растворенных веществ как в речных, так и в подземных водах.

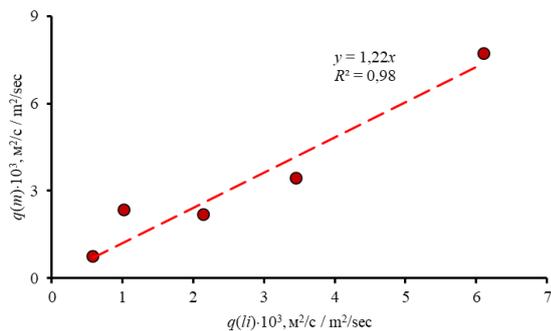
Полученные данные в целом свидетельствуют о значительной роли поверхностного стока в формировании общего речного стока и подземного стока в зоне активного водообмена (преобладание нисходящего режима для речных долин), что определяет необходимость более иного подхода к определению границ водоохранных зон для поверхностных водных объектов и санитарных защитных зон для поверхностных и подземных водозаборов.

Кроме того, очевидно, что на большей части рассматриваемой территории подземная составляющая речного стока средних рек (по [51]) и, соответственно, подземный сток в зоне активного водообмена ограничены отложениями кайнозоя, но на южных участках, в частности – в водосборе р. Чаи, возможен приток подземных вод из меловых отложений.



**Рис. 2.** Изменение подземной составляющей речного стока изученных рек; условные обозначения: а) Обь у с. Александровское; б) Тым у с. Напас; с) Кеть у п. Белый Яр; д) Васюган у с. Средний Васюган; е) Чая у с. Подгорное; удельный расход воды: А – из отложений неоген-четвертичного возраста; В – из отложений палеогенового возраста; С – подземных вод из отложений неоген-четвертичного и палеогенового возраста; D – суммарный речной сток; dQ – удельный расход воды

**Fig. 2.** Changes in the underground component of river runoff of the studied rivers: а) Ob river at Aleksandrovskoe village; б) Tym river at Napas village; с) Ket river at Bely Yar village; д) Vasyugan river at Sredny Vasyugan village; е) Chaya river at Podgornoe village; specific water consumption: А – from Neogene-Quaternary deposits; В – from Paleogene deposits; С – groundwater from Neogene-Quaternary and Paleogene deposits; D – total river runoff; dQ is the specific water consumption



**Рис. 3.** Зависимость между результатами расчета подземного стока  $q(m)$  по модели (10), (11) и линейной интерполяцией  $q(li)$  по уравнению (24);  $R^2$  – квадрат корреляционного отношения при расчете  $q(m)$  по  $q(li)$

**Fig. 3.** Relationship between the results of calculating the underground flow  $q(m)$  using model (10), (11) and the linear interpolation  $q(li)$  using equation (24);  $R^2$  is the square of the correlation ratio when calculating  $q(m)$  using  $q(li)$

При этом отметим, что примерно на этой же территории наблюдается заметное изменение мощности отложений мела и палеогена и, особенно, уклонов их залегания (рис. 1, б). В частности, на участке длиной 117 км уклон подошвы отложений палеогена составляет ориентировочно 0,93 м/км, а неоген-четвертичных отложений – 0,32 м/км. При этом отмечается понижение отметок подошвы палеогеновых отложений на 108 м, а их суммарная мощность увеличивается примерно на 70 м, что, возможно, обуславливает сначала некоторое увеличение скоростей движения подземных вод в верхнем течении левых притоков р. Оби (притоки рр. Чай и Парабель), а затем их снижение в среднем течении. Соответственно меняется и транспортирующая способность регионального подземного стока (уменьшается), и время взаимодействия вод с горными породами (увеличивается). Предположим, что выполняются следующие условия:

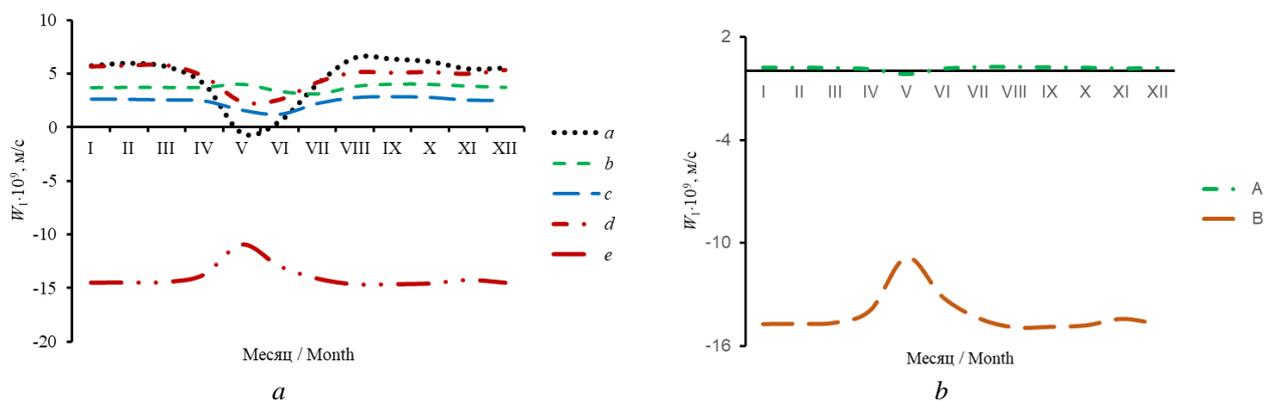
- 1) воды из отложений докайнозойских отложений поступают в палеогеновый водоносный горизонт в пределах верхнего и среднего участков водосбора р. Чаи в интервале глубин  $-76 \dots -176$  м БС (на рис. 1, *b*:  $L=554$  км,  $H(<KZ)=-72$  м БС;  $L=671$  км,  $H(<KZ)=-180$  м БС; по 4 м сверху и снизу на ограничения на переходные условия по фильтрационным свойствам), то есть по слою мощностью 100 м;
- 2) напор составляет 0,63 м/км (среднее из уклонов 0,32 и 0,93 м/км), коэффициент фильтрации принят в размере  $7,42 \cdot 10^{-5}$  м/с  $\approx 4$  м/сут (то есть фильтрационные свойства, характерные (ориентировочно в среднем) для глинистых песков и супеси с активной пористостью около 0,4 [5, 15, 44];
- 3) среднее содержание общего железа в подземных водах лесостепи в бассейне Верхней Оби в докайнозойских образованиях ( $5,43 \pm 4,97$  мг/дм<sup>3</sup>) выше, чем в палеогеновых ( $1,28 \pm 0,42$  мг/дм<sup>3</sup>) и неоген-четвертичных ( $2,45 \pm 1,05$  мг/дм<sup>3</sup>) отложениях на этой же территории, но несколько ниже, чем в отложениях палеогена ( $6,18 \pm 0,58$  мг/дм<sup>3</sup>), и больше, чем в неоген-четвертичных отложениях ( $2,55 \pm 0,32$  мг/дм<sup>3</sup>) в левобережной части бассейна Средней Оби в подзоне южной тайги [38].

В то же время наблюдается существенное снижение относительного содержания соединений  $Fe^{2+}$  в водах по мере увеличения интенсивности водообмена и содержания растворенного кислорода при примерно сопоставимых значениях окисляемости [26, 27, 35, 38, 55–57]. Например, в водах верхнемелового водоносного комплекса у с. Мельнико-

во (примерно на широте верховий притоков р. Чаи) отмечено среднее содержание общего железа в размере 6,8 мг/дм<sup>3</sup> при доле  $Fe^{2+}$  (в среднем) около 73 % [58] при том, что в поверхностных водах последняя величина стремится к нулю, а основное снижение происходит в пределах первого водоносного комплекса, в частности в пределах Обь-Томского междуречья отношение  $Fe^{2+}/Fe_{общ.}$  снижается с 0,77 в водах верхнемелового комплекса до 0,64 в неоген-четвертичных отложениях [26, 27, 59];

Таким образом, в первом приближении содержание  $Fe^{2+}$  уменьшается с 4,18 мг/дм<sup>3</sup> ( $5,43$  мг/дм<sup>3</sup> · 0,77) в докайнозойских образованиях в бассейне Верхней Оби до 1,63 мг/дм<sup>3</sup> ( $2,55$  мг/дм<sup>3</sup> · 0,64) в неоген-четвертичных отложениях южной тайги в левобережье Оби, то есть общее снижение концентраций – 2,55 мг/дм<sup>3</sup>.

Тогда с учетом указанных выше допущений среднегодовое количество расход подземных вод в слое мощностью 100 м и шириной 1000 м по поперечному сечению водосбора р. Чаи в ее среднем течении ориентировочно оценивается в размере 1,86 м<sup>3</sup>/с ( $4,65 \cdot 10^{-5}$  м/с × 100 м × 1000 м × 0,4), или 0,06 км<sup>3</sup>/год, а максимально возможное снижение выноса  $Fe^{2+}$  (при снижении концентраций на 2,55 мг/дм<sup>3</sup>) – около 150 т/год. Безусловно, это максимально высокая оценка, превышающая фактическое уменьшение выноса соединений  $Fe^{2+}$ . Тем не менее можно предположить, что хотя бы малая часть этой величины может способствовать накоплению соединений железа в отложениях палеогена в бассейне Средней Оби.



**Рис. 4.** Внутригодовое изменение величины  $W_1$  (12) по расчетным профилям в целом для кайнозойских отложений (рис. 2, *a–e*; условные обозначения к рис. 2) в целом для зоны активного водообмена (*a*) и отдельно для неоген-четвертичных и палеогеновых отложений в створе р. Чаи у с. Подгорное (*b*); поступление воды: *A* – отложения неоген-четвертичного возраста; *B* – отложения палеогенового возраста

**Fig. 4.** Intra-annual changes in  $W_1$  value (12) along the calculated profiles as a whole for Cenozoic deposits (Fig. 2, *a–e*; legend to Fig. 2) as a whole for the zone of active water exchange (*a*) and separately for Neogene-Quaternary and Paleogene deposits in the section of the Chaya river at Podgornoe (*b*); water inflow into: *A* – Neogene-Quaternary deposits; *B* – Paleogene deposits

С учетом высокой заболоченности как в настоящее время, так в рамках палеогена [26, 60–62], это позволяет утверждать вслед за авторами [35], что формирование железорудных узлов на юге Западно-Сибирской равнины как минимум связано не только (и, скорее всего, не столько) с подъемом флюидов, стоком с палеозойского обрамления и процессами осаждения в прибрежной зоне палеоморя в мезозое и палеогене [63, 64]. Причем накопление соединений железа в отложениях палеогена и, возможно, верхнего мела связано не только с их выносом из водовмещающих отложений и перераспределением в пространстве, но и с выпадением малорастворимых соединений на участках относительно резкого изменения величины и конфигурации подземных потоков на стыке лесостепной и таежной зон.

### Заключение

Разработана методика оценки подземной составляющей речного стока в пределах Западно-Сибирской равнины по данным о среднемесячных (в среднем за многолетний период) расходах и уровнях речных вод в зимнюю межень и уровнях подземных вод в зоне активного водообмена. Методика максимально адаптирована к требованиям действующего Российского законодательства и характеру информации, получаемой в системе государственного мониторинга поверхностных и подземных вод (на территории Российской Федерации), включает в себя анализ гидрогеохимического баланса и определение методами математической

статистики и оптимизации параметров, соответствующих среднему по поперечному профилю коэффициенту фильтрации и удельному притоку подземных вод с учетом гидрогеологических различий на лево- и правобережной частях профиля.

Методика апробирована на примере Оби и крупных притоков на участке ее среднего течения. Показано, что в большинстве случаев средние и большие реки рассматриваемой территории характеризуются преобладанием нисходящего режима взаимодействия речных и подземных вод в пределах речных долин, а нижний предел определения подземной составляющей речного стока может быть определен с использованием линейной интерполяции между значениями стока в марте и декабре по уравнению (24). Вместе с тем для более точной оценки подземного стока целесообразны поддержание и расширение существующей системы наблюдений на режимных гидрогеологических скважинах, вскрывающих первый и прочие водоносные горизонты, особенно – в водосборах рек сложной конфигурации (например, р. Васюган).

Анализ полученных результатов также показал, что гидрогеологические условия, точнее – их изменения на границе лесостепной и таежной зон, могли ранее (в верхнем меле и палеогене) и могут в настоящее время способствовать аккумуляции соединений железа. Для уточнения этого предположения целесообразно проведение комплекса гидрогеологических и геохимических исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1960. – 343 с.
2. Биндеман Н.Н., Язвин Л.С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. 2-е издание. – М.: Недра, 1970 – 216 с.
3. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications. – Turin: UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
4. Подземные воды мира. Ресурсы, использование, прогнозы / под ред. И.С. Зекцера. – М.: Наука, 2007. – 438 с.
5. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2<sup>nd</sup> ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
6. Manual on stream gauging. Vol. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
7. Manual on Stream Gauging. Vol. II. Computation of Discharge. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 198 p.
8. Боровский Б.В., Марков М.Л. Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока? // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 5. – С. 10–16.
9. Danilov-Danilyan V.I., Klyuev N.N., Kotlyakov V.M. Russia in the global natural and ecological space // Regional Research of Russia. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 34–57. DOI: 10.1134/S2079970522700472.
10. Zanini A., Celico F. Advances in aquifer systems analysis: flows, interactions, quality status, and remediation // Water. – 2025. – № 17. – P. 421. DOI: 10.3390/w17030421.
11. A Comprehensive Review of Riverbank Filtration Technology for Water Treatment / Y. Gao, Y. Tang, M. Zhao, X. Zheng, H. Jin // Water 2025. – 2025. – № 17. – P. 371. DOI: 10.3390/w17030371.
12. Introduction to hydrology. 2<sup>nd</sup> ed. / Ed. by Jr. W. Viessman, J.W. Knapp, G.L. Lewis, T.E. Harbaugh. – New York, USA: Intext educational Publishers, 1977. – 704 p.
13. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 357 с.
14. Kalbus E., Reinstorf F., Schirmer M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review // Hydrology and Earth System Sciences. – 2006. – № 10. – P. 873–887.
15. Hendriks M.R. Introduction to physical hydrology. – Oxford, New York: Oxford University Press, UK, 2010. – 331 p.
16. Grinevskii S.O., Pozdnyakov S.P. Principles of regional estimation of infiltration groundwater recharge based on geohydrological models // Water Resources. – 2010. – Vol. 37. – № 5. – P. 638–652. DOI: 10.1134/S0097807810050040.

17. Guidance on environmental flows. Integrating e-flow science with fluvial geomorphology to maintain ecosystem services. No. 2. Vol. III. Hydrology. WMO-No. 1235. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), 2019. – 41 p.
18. Савичев О.Г. Гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2021. – 167 с.
19. Algorithm grwat for automated hydrograph separation by B.I. Kudelin's method: problems and perspectives / E.P. Rets, M.B. Kireeva, T.E. Samsonov, A.V. Gorbarenko, N.L. Frolova, N.N. Ezerova // Water Resources. – 2022. – Vol. 49. – № 1. – P. 23–37. DOI: 10.1134/S0097807822010146.
20. Christenson C., Cardiff M. Where has hydrogeologic science been, and where is it going? Research trends in hydrogeology publishing over the past 60 years // Hydrogeology journal. – 2024. – Vol. 32. – P. 1787–1800. DOI: 10.1007/s10040-024-02829-4.
21. Chemical indication of the processes of freshet runoff formation in a small experimental catchment in the Prilenskoe plato, the Republic of Sakha (Yakutia) / V.V. Shamov, T.N. Lutsenko, L.S. Lebedeva, A.M. Tarbeeva, V.S. Efremov, N.A. Pavlova, M.I. Ksenofontova // Water resources. – 2023. – Vol. 50. – № 3. – P. 379–391. DOI: 10.1134/s0097807823030120.
22. Лукин А.А. Морфоструктурно-гидрогеологический анализ. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 1995. – 48 с.
23. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В. Анализ развития экзогенных геологических процессов на основе моделей математической морфологии ландшафта // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. – 2023. – № 6. – С. 16–25. DOI: 10.31857/s0869780923060085.
24. Groundwater discharge contribution to dissolved inorganic carbon and riverine carbon emissions in a subarctic region / A. Biehler, B. Baudron, Th. Buffin-Bélanger, G. Chaillou // Biogeochemistry. – 2023. – № 165. – P. 129–150. DOI: 10.1007/s10533-023-01060-9.
25. Гриневский С.О., Преображенская А.Е., Цяпа Л.П. Идентификация гидрогеодинамических условий потока подземных вод по опытным данным // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2009. – № 3. – С. 39–44.
26. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. – 248 с.
27. 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. – Vol. 147. – № 3–4. – P. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00704-021-03879-4.
28. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. – М.: Изд-во КДУ, 2009. – 334 с.
29. ГОСТ Р 59054-2020. Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Классификация водных объектов. Environmental protection. Surface and underground water. Classification of water bodies. – М.: Стандартинформ, 2020. – 21 с.
30. Гидрогеология СССР. Т. 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области). – М.: Недра, 1970. – 368 с.
31. Гидрогеология СССР. Т. 17. Кемеровская область и Алтайский край. – М.: Недра, 1972. – 398 с.
32. Создание электронной версии карты четвертичных отложений Томской области масштаба 1:500000 / Ю.В. Макушин, Н.Г. Глущенко, Н.И. Глущенко, Е.К. Панаева // Геоинформатика-2000: Труды Международн. научно-практ. конф. – Томск, 12–14.09.2000. – Томск: Томск. гос. ун-т, 2000. – С. 142–144.
33. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – Vol. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
34. Cretaceous paleogeography of the West Siberian sedimentary basin / A.E. Kontorovich, S.V. Ershov, V.A. Kazanekov, Yu.N. Karogodin, V.A. Kontorovich, N.K. Lebedeva, B.L. Nikitenko, N.I. Popova, B.N. Shurygin // Geology and geophysics. – 2014. – Vol. 55. – № 5–6. – P. 745–776.
35. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода: в 5 т. Т. 2. Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепокурова / отв. ред. Б.Н. Рыженко. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
36. Палеотемпературное моделирование очагов генерации углеводородов и их роль в формировании залежей «палеозойской» нефти (Останинское месторождение, Томская область) / В.И. Исаев, М.Ф. Галиева, А.О. Алеева, Г.А. Лобова, В.И. Старостенко, А.Н. Фомин // Георесурсы. – 2021. – Т. 23. – № 1. – С. 2–16. DOI: 10.18599/grs.2021.1.1.
37. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2022 г. Информационный бюллетень, выпуск 19. – Томск: Филиал «Сибирский региональный центр ГМЧН», 2023. – 242 с.
38. Zemtsov V., Savichev O., Petrova V. The mechanism and regularities of ion runoff formation in the Ob River (Western Siberia) under the Influence of its tributaries and underground feeding // Water. – 2023. – Vol. 15. – P. 2413. DOI: 10.3390/w15132413.
39. Савичев О.Г. Изменения условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод при заболачивании Западно-Сибирской равнины в голоцене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 170–186. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4535.
40. СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Минстрой РФ, 2023. – 152 с.
41. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
42. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений / под ред. А.В. Рождественского, А.Г. Лобановой. – СПб: Нестор-История, 2009. – 193 с.
43. Гельфан А.Н. Динамика-стохастическое моделирование формирования талого стока. – М.: Наука, 2007. – 279 с.
44. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
45. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши / под ред. П.П. Кузьмина, С.М. Алпатьева. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 114 с.
46. Основные гидрологические характеристики. Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 488 с.
47. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. – М.: Стандартинформ, 2021. – 228 с.

48. Водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 2022 год. – СПб: Росгидромет, 2023. – 153 с.
49. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023. – 686 с.
50. Водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 4 августа 2023 года). Кодекс РФ от 03.06.2006 N 74-ФЗ. – М.: Кремль, 2023. – 52 с.
51. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
52. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 (с Изменением N 1). Engineering survey for construction. Basic principles. – М.: Минстрой РФ, 2016. – 111 с.
53. Technical Regulations. Basic Documents No. 2. Vol. III – Hydrology. 2021 ed. WMO-No. 49. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), 2021. – 21 p.
54. СТО ГГИ 52.08.37-2015. Влагозапасы и промерзание почв, испарение с почвы и водной поверхности при региональном изменении климата. Рекомендации по расчету и прогнозу средних многолетних изменений. – СПб: ART-XPRESS, 2015. – 40 с.
55. Water–rock–organic matter interactions in wetland ecosystem: hydrogeochemical investigation and computer modeling / O. Shvartseva, O. Gaskova, A. Yurtaev, A. Boguslavsky, M. Kolpakova, D. Mashkova // Water. – 2024. – Vol. 16. – P. 428. DOI: 10.3390/w16030428.
56. Dissolved iron and organic matter in Boreal rivers across a South–North transect / A. Aleshina, M.A. Rusakova, O.Y. Drozdova, O.S. Pokrovsky, S.A. Lapitskiy // Environments. – 2024. – Vol. 11. – P. 65. DOI: 10.3390/environments11040065.
57. Macro- and micronutrient release from ash and litter in permafrost-affected forest / D. Kuzmina, S.V. Loiko, A.G. Lim, G.I. Istigechev, S.P. Kulizhsky, F. Julien, J.L. Rols, O.S. Pokrovsky // Geoderma. – 2024. – Vol. 447. – P. 116925. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116925.
58. Горохова И.В., Зятева О.Ф. Геохимия минеральных вод верхнемеловых отложений в с. Мельниково Томской области // Обской вестник. – 2001. – № 1. – С. 110–113.
59. Колоколова О.В. Геохимия подземных вод района Томского водозабора: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 21 с.
60. 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. Слукка, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
61. 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. – Vol. 190 – P. 315–341.
62. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status / S. Hu, Zh. Niu, Y. Chen, L. Li, H. Zhang // Science of the Total Environment. – 2017. – Vol. 586. – P. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
63. Origin of ooids, peloids and micro-oncoids of marine ironstone deposits in Western Siberia (Russia) / M. Rudmin, S. Banerjee, P. Maximov, A. Novoselov, Y. Trubin, P. Smirnov, A. Abersteiner, D. Tang, A. Mazurov // Journal of Asian Earth Sciences. – 2022. – Vol. 237. – P. 105361. DOI: 10.1016/J.JSEAES.2022.105361.
64. Западно-Сибирский железорудный пояс: проблемы и перспективы / В.А. Домаренко, А.Я. Пшеничкин, В.П. Дмитриенко, Е.В. Перегудина, Б.К. Кенесбаев. – Томск: ООО «СТТ», 2024. – 180 с.

### Информация об авторах

**Олег Геннадьевич Савичев**, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. osavichev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9561-953X>

Поступила в редакцию: 07.03.2025

Поступила после рецензирования: 02.04.2025

Принята к публикации: 10.04.2025

### REFERENCES

1. Kudelin B.I. *Principles of regional assessment of natural groundwater resources*. Moscow, Moscow State University Publ., 1960. 343 p. (In Russ.)
2. Bindeman N.N., Yazvin L.S. *Assessment of exploitable reserves of groundwater*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Nedra Publ., 1970. 216 p. (In Russ.)
3. Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications*. Turin, UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
4. *Groundwater of the world. Resources, use, prognoses*. Ed. by I.S. Zektser. Moscow, Nauka Publ., 2007. 438 p. (In Russ.)
5. Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2<sup>nd</sup> ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
6. *Manual on stream gauging*. Vol. I. *Fieldwork*. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
7. *Manual on Stream Gauging*. Vol. II. *Computation of Discharge*. WMO-No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 198 p.
8. Borevskiy B.V., Markov M.L. Is the low-water discharge of rivers a measure of groundwater recharge or total underground flow? *Exploration and protection of mineral resources*, 2014, no. 5, pp. 10–16. (In Russ.)

9. Danilov-Danilyan V.I., Klyuev N.N., Kotlyakov V.M. Russia in the global natural and ecological space. *Regional Research of Russia*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 34–57. DOI: 10.1134/S2079970522700472.
10. Zanini A., Celico F. Advances in aquifer systems analysis: flows, interactions, quality status, and remediation. *Water*, 2025, vol. 17, pp. 421. DOI: 10.3390/w17030421.
11. Gao Y., Tang Y., Zhao M., Zheng X., Jin H. A comprehensive review of riverbank filtration technology for water treatment. *Water*, 2025, vol. 17, pp. 371. DOI: 10.3390/w17030371.
12. *Introduction to hydrology*. 2<sup>nd</sup> ed. Eds. Jr. W. Viessman, J.W. Knapp, G.L. Lewis, T.E. Harbaugh. New York, Intext educational Pub., 1977. 704 p.
13. *Guide to hydrological forecasts. Iss. 1. Long-term forecasts of the elements of the water regime of rivers and reservoirs*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 357 p. (In Russ.)
14. Kalbus E., Reinstorf F., Schirmer M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, vol. 10, pp. 873–887.
15. Hendriks M.R. *Introduction to physical hydrology*. Oxford; New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
16. Grinevskii S.O., Pozdnyakov S.P. Principles of regional estimation of infiltration groundwater recharge based on geohydrological models. *Water Resources*, 2010, vol. 37, no. 5, p. 638–652. DOI: 10.1134/S0097807810050040.
17. *Guidance on environmental flows. Integrating e-flow science with fluvial Geomorphology to maintain ecosystem services*. No. 2. Vol. III. Hydrology, WMO-No. 1235. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization (WMO), 2019. 41 p.
18. Savichev O.G. *Hydroecological substantiation of water management decisions*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2021. 167 p. (In Russ.)
19. Rets E.P., Kireeva M.B., Samsonov T.E., Gorbarenko A.V., Frolova N.L., Ezerova N.N. Algorithm grwat for automated hydrograph separation by b.i. kudelin's method: problems and perspectives. *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 1, pp. 23–37. DOI: 10.1134/S0097807822010146.
20. Christenson C., Cardiff M. Where has hydrogeologic science been, and where is it going? Research trends in hydrogeology publishing over the past 60 years. *Hydrogeology journal*, 2024, vol. 32, p. 1787–1800. DOI: 10.1007/s10040-024-02829-4.
21. Shamov V.V., Lutsenko T.N., Lebedeva L.S., Tarbeeva A.M., Efremov V.S., Pavlova N.A., Ksenofontova M.I. Chemical indication of the processes of freshet runoff formation in a small experimental catchment in the Prilenskoe plato, the Republic of Sakha (Yakutia). *Water resources*, 2023, vol. 50, no. 3, p. 379–391. DOI: 10.1134/s0097807823030120.
22. Lukin A.A. *Morphostructural-hydrogeological analysis*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 1995. 48 p. (In Russ.)
23. Viktorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V. Analysis of the exogenous geological process development based on the models of the mathematical morphology of landscapes. *Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2023, no. 6, pp. 16–25. (In Russ.) DOI: 10.31857/s0869780923060085.
24. Biehler A., Baudron B., Buffin-Bélanger Th., Chaillou G. Groundwater discharge contribution to dissolved inorganic carbon and riverine carbon emissions in a subarctic region. *Biogeochemistry*, 2023, vol. 165, pp. 129–150. DOI: 10.1007/s10533-023-01060-9.
25. Grinevskiy C.O., Preobrazhenskaya A.E., Tsyapa L.P. Identification of hydrogeodynamic conditions of groundwater flow based on experimental data. *News of higher educational institutions. Geology and exploration*, 2009, no. 3, p. 39–44. (In Russ.)
26. Savichev O.G. *Water resources of the Tomsk region*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2010. 248 p. (In Russ.)
27. 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, vol. 147 (3–4), pp. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00704-021-03879-4.
28. Shestakov V.M. *Hydrogeodynamics*. Moscow, KDU Publ., 2009. 334 p. (In Russ.)
29. SS R 59054-2020. *Environmental protection. Surface and underground water. Classification of water bodies*. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 2020. 21 p. (In Russ.)
30. *Hydrogeology of the USSR. Vol. 16. The West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)*. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p. (In Russ.)
31. *Hydrogeology of the USSR. Vol. 17. Kemerovo and Altai regions*. Moscow, Nedra Publ., 1972. 398 p. (In Russ.)
32. Makushin Yu.V., Glushchenko N.G., Glushchenko N.I., Panaeva E.K. Creation of an electronic version of the map of Quaternary deposits of the Tomsk region at a scale of 1:500000. *Geoinformatics-2000. Proc. of the International scientific and practical conference*. Tomsk, September 12–14, 2000. Tomsk, Tomsk state university Publ., 2000. pp. 142–144. (In Russ.)
33. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
34. Kontorovich A.E., Ershov S.V., Kazanenkov V.A., Karogodin Yu.N., Kontorovich V.A., Lebedeva N.K., Nikitenko B.L., Popova N.I., and Shurygin B.N. Cretaceous paleogeography of the West Siberian sedimentary basin. *Geology and geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, p. 745–776.
35. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondratieva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geological evolution and self-organizing of water–rock system. Vol. 1. Water–rock system in conditions of a zone of active water exchange*. Ed. by B.N. Ryzhenko. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ. house, 2007. 389 p. (In Russ.)
36. Isayev V.I., Galiyeva M.F., Aleyeva A.O., Lobova G.A., Starostenko V.I., Fomin A.N. Paleotemperature modeling of hydrocarbon generation centers and their role in the formation of "Paleozoic" oil deposits (Ostaninskoye field, Tomsk region). *Georesources*, 2021, vol. 23, no. 1, p. 2–16. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.1>
37. *Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2022. Informational bulletin*. Vol. 19. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalny tsentr GMSN», Gidrospetsgeologiya Publ., 2023. 242 p. (In Russ.)
38. Zemtsov V., Savichev O., Petrova V. The mechanism and regularities of ion runoff formation in the Ob River (Western Siberia) under the Influence of its tributaries and underground feeding. *Water*, 2023, vol. 15, pp. 2413. DOI: 10.3390/w15132413.

39. Savichev O.G. Changes in hydrogeological conditions during swagging in the South-East of the West Siberian plain. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, p. 170–186. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4535.
40. *Determination of the main calculated hydrological characteristics. Determination of the main design hydrological characteristics*. Moscow, Ministry of Construction of the Russian Federation Publ., 2023. 152 p. (In Russ.)
41. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
42. *Methodological recommendations for determining the calculated hydrological characteristics in the absence of hydrometric observations*. Eds. A.V. Rozhdestvensky, A.G. Lobanova. St. Petersburg, Nestor-History Publ., 2009. 193 p. (In Russ.)
43. Gelfan A.N. *Dynamic-stochastic modeling of the formation of snowmelt runoff*. Moscow, Nauka Publ., 2007. 279 p. (In Russ.)
44. Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelling of heat and mass transfer of the land surface to the atmosphere*. Moscow, Nauka Publ., 2010. 327 p. (In Russ.)
45. *Recommendations for calculating evaporation from the land surface*. Eds. P.P. Kuzmin, S.M. Alpatiev. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976. 114 p.
46. *Basic hydrological characteristics. Vol. 15. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan. Iss. 1. Upper and Middle Ob*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 488 p. (In Russ.)
47. *SP 131.13330.2020. Building climatology climatology*. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 228 p. (In Russ.)
48. *Water cadastre. Surface and groundwater resources, their use and quality. 2022*. St. Petersburg, Roshydromet Publ., 2023. 153 p. (In Russ.)
49. *On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022. State report*. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University Publ., 2023. 686 p. (In Russ.)
50. *Water Code of the Russian Federation (as amended on August 4, 2023) (version effective from September 1, 2023). Code of the Russian Federation of 03.06.2006 N 74-FZ*. Moscow, Kremlin Publ., 2023. 52 p. (In Russ.)
51. *SS 19179-73. Land hydrology. Terms and definitions*. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p. (In Russ.)
52. *SP 47.13330.2016. Engineering survey for construction. Basic principles*, Moscow, Standartinform Publ., 2016. 111 p. (In Russ.)
53. *Technical Regulations. Basic Documents*. No. 2. Vol. III. Hydrology. 2021 edition. WMO-No. 49. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization (WMO), 2021. 21 p.
54. *STO GGI 52.08.37-2015. Moisture reserves and soil freezing, evaporation from soil and water surface under regional climate change. Recommendations for calculation and forecast of average long-term changes*. St Petersburg, ART-XPRESS Publ., 2015. 40 p. (In Russ.)
55. Shvartseva O., Gaskova O., Yurtaev A., Boguslavsky A., Kolpakova M., Mashkova D. Water–rock–organic matter interactions in wetland ecosystem: hydrogeochemical investigation and computer modeling. *Water*, 2024, vol. 16, pp. 428. DOI: 10.3390/w16030428.
56. Aleshina A., Rusakova M.A., Drozdova O.Y., Pokrovsky O.S., Lapitskiy S.A. Dissolved iron and organic matter in Boreal rivers across a South–North transect. *Environments*, 2024, vol. 11, pp. 65. DOI: 10.3390/environments11040065.
57. Kuzmina D., Loiko S.V., Lim A.G., Istigechev G.I., Kulizhsky S.P., Julien F., Rols J.L., Pokrovsky O.S. Macro- and micronutrient release from ash and litter in permafrost-affected forest. *Geoderma*, 2024, vol. 447, pp. 116925. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116925.
58. Gorokhova I.V., Zyateva O.F. Geochemistry of mineral waters of the Upper Cretaceous deposits in the village. Melnikovo of the Tomsk region. *Obskoy vestnik*, 2001, no. 1, pp. 110–113. (In Russ.)
59. Kolokolova O.V. *Geochemistry of groundwater in the Tomsk water intake area*. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 2003. 21 p. (In Russ.)
60. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bog of Western Siberia and their conservation value*. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p. (In Russ.)
61. 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.
62. Hu S., Niu Zh., Chen Y., Li L., Zhang H. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 586, pp. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
63. Rudmin M., Banerjee S., Maximov P., Novoselov A., Trubin Y., Smirnov P., Abersteiner A., Tang D., Mazurov A. Origin of ooids, peloids and micro-oncoids of marine ironstone deposits in Western Siberia (Russia). *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, vol. 237, pp. 105361. DOI: 10.1016/J.JSEAES.2022.105361.
64. Domarenko V.A., Pshenichkin A.Ya, Dmitriyenko V.P., Peregudina E.V., Kenesbayev B.K. *West Siberian iron ore belt: problems and prospects*. Tomsk, OC "CTT" Publ., 2024. 180 p. (In Russ.)

### Information about the authors

**Oleg G. Savichev**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. OSavichev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9561-953X>

Received: 07.03.2025

Revised: 02.04.2025

Accepted: 10.04.2025