

Читать  
онлайн  
Read  
online

Никуленков А.М.<sup>1</sup>, Синдаловский Л.Н.<sup>1</sup>, Еремин Г.Б.<sup>2</sup>, Борисова Д.С.<sup>2</sup>,  
Мозжухина Н.А.<sup>3</sup>, Мегорский В.В.<sup>2,4</sup>, Бузинов Р.В.<sup>2</sup>

## Подходы к сокращению зон санитарной охраны береговых водозаборов подземных вод

<sup>1</sup> Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН имени Е.М. Сергеева, 199004, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья», 191036, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Минздрава России, 191015, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>4</sup> Научно-исследовательский центр медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике – филиал Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», 184209, Апатиты, Россия

**Введение.** В статье рассматривается методика сокращения второго и третьего поясов зон санитарной охраны (ЗСО) на акватории поверхностного водотока для случая берегового водозабора подземных вод. Приведены базовые гидродинамические и геомиграционные аналитические решения, которые позволяют оценить время миграции загрязнения от реки к подземному водозабору и степень разбавления речных вод подземными.

**Материалы и методы.** Рассмотрены нормативно-правовые акты, регулирующие отношения в сфере проектирования и установления ЗСО, проекты ЗСО, литературные источники. Методологическую основу для сокращения ЗСО береговых водозаборов составили гидродинамические и геомиграционные аналитические расчёты, заложенные в программный комплекс АНСДИМАТ.

**Результаты.** При проектировании берегового водозабора подземных вод и разработке проекта ЗСО можно рекомендовать последовательность действий, позволяющую сократить или вовсе уйти от организации ЗСО на поверхностном водотоке. 1. Расположить береговой водозабор подземных вод таким образом, чтобы третий пояс ЗСО не замыкался на поверхностный водоток. 2. Оценить время миграции. Если оно будет больше 400 сут, то можно отказаться от организации второго пояса ЗСО на поверхностном водотоке, а если время миграции загрязнения будет более 25 лет, то можно отказаться и от третьего пояса. 3. Даже при постоянном превышении ПДК в речных водах возможно обосновать такой расход скважины, который не приведёт к превышению ПДК в воде водозабора. 4. Если названные условия выполнить невозможно, необходимо организовать пояса ЗСО как для подземного водозабора, так и для поверхностного водотока.

**Заключение.** Учёт данных рекомендаций при разработке подземных береговых водозаборов позволяет использовать все преимущества береговых водозаборов и при этом не выводить из хозяйственного использования большие территории.

**Ключевые слова:** зона санитарной охраны (ЗСО) берегового водозабора; сокращение зон санитарной охраны; гидродинамические расчёты; время миграции загрязнения от реки к водозабору

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

**Для цитирования:** Никуленков А.М., Синдаловский Л.Н., Еремин Г.Б., Борисова Д.С., Мозжухина Н.А., Мегорский В.В., Бузинов Р.В. Подходы к сокращению зон санитарной охраны береговых водозаборов подземных вод. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(8): 757–763. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-8-757-763> <https://elibrary.ru/sswvymj>

**Для корреспонденции:** Еремин Геннадий Борисович, канд. мед. наук, зав. отд. анализа рисков здоровью населения ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья». E-mail: yeremin45@yandex.ru

**Участие авторов:** Никуленков А.М. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материалов, написание текста; Синдаловский Л.Н. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, написание текста; Еремин Г.Б. – концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи; Борисова Д.С., Мозжухина Н.А., Бузинов Р.В. – редактирование; Мегорский В.В. – сбор и обработка материала.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 28.04.2023 / Принята к печати: 07.06.2023 / Опубликовано: 09.10.2023

Anton M. Nikulenkov<sup>1</sup>, Leonid N. Sindalovskiy<sup>1</sup>, Gennadiy B. Yeremin<sup>2</sup>, Darya S. Borisova<sup>2</sup>,  
Natal'ya A. Mozhukhina<sup>3</sup>, Vladimir V. Megorskiy<sup>2,4</sup>, Roman V. Buzinov<sup>2</sup>

## Approaches to reducing sanitary protection zones of coastal groundwater intakes

<sup>1</sup> Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199004, Russian Federation;

<sup>2</sup> North-West Public Health Research Center, St. Petersburg, 191036, Russian Federation;

<sup>3</sup> Mechnikov North-West State Medical University, St. Petersburg, 191015, Russian Federation;

<sup>4</sup> R&D Center for Human Adaptation in the Arctic «Kola Science Center of Russian Academy of Sciences», Apatity, 184209, Russian Federation

**Introduction.** The article discusses methods to reduce the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> Sanitary Protection Zones (SPZ) on the surface watercourse for the intake of onshore groundwater. There are presented basic hydrodynamic and geo-migration analytical solutions allowing the estimation the time of the pollution migration from the river to the underground water intake. These basic analytical solutions also estimate the degree of dilution of river waters by groundwater.

**Materials and methods.** Laws & Acts regulating relations in the Design and Establishment of SPZ, SPZ Projects & related Scientific References. The methodological basis for reducing the zones of sanitary protection of coastal water intakes was undertaken using the hydrodynamic and geo-migration analytical calculations included within the ANSDIMAT software package.

**Results.** When designing a coastal groundwater intake and developing a SPZ project, the following sequence of actions are recommended to reduce or completely avoid the management of the SPZ on a surface watercourse: 1. Locate the onshore groundwater intake in such a way that the 3<sup>rd</sup> belt of the SPZ is not close to the surface watercourse. 2. Estimate the pollution migration time. If it is more than four hundred days, then it is possible to abandon the management of the 2<sup>nd</sup> zone of the SPZ on the surface watercourse, and if the migration time of the pollution is more than 25 years, then the 3<sup>rd</sup> belt can also be completely abandoned. 3. Even with a constant excess of MPC (Maximum Permissible Concentration) in river waters, it is still possible to justify such a well flow rate that will not lead to an excess of MPC in water intake. 4. If it is impossible to fulfill the required project conditions, then it is necessary to manage the SPZ belts both for underground water intake and for the surface watercourse.

**Conclusion.** Our recommendations for developing underground onshore water intakes make it possible to use all the advantages of onshore water intakes, whilst not withdrawing large areas from economic use.

**Keywords:** Sanitary Protection Zones (SPZ) of coastal groundwater intake; reduction of SPZ hydrodynamic calculations; time of pollution migration from the river to the water intake

**Compliance with ethical standards.** The study does not require the submission of a biomedical ethics committee opinion or other documents.

**For citation:** Nikulenkov A.M., Sindalovskiy L.N., Yeremin G.B., Borisova D.S., Mozhukhina N.A., Megorskiy V.V., Buzinov R.V. Approaches to reducing sanitary protection zones of coastal groundwater intakes. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(8): 757–763. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-8-757-763> <https://elibrary.ru/sswmyj> (in Russian)

**For correspondence:** Gennadiy B. Yeremin, Head of the Department of health risk analysis North-West Public Health Research Center, Apatity, 184209, Russian Federation. E-mail: [yeremin45@yandex.ru](mailto:yeremin45@yandex.ru)

#### Information about authors:

Nikulenkov A.M., <https://orcid.org/0000-0001-5498-076X>

Yeremin G.B., <https://orcid.org/0000-0002-1629-5435>

Mozhukhina N.A., <https://orcid.org/0000-0002-8051-097X>

Buzinov R.V., <https://orcid.org/0000-0002-8624-6452>

Borisova D.S., <https://orcid.org/0000-0003-1778-4465>

Megorskiy V.V., <https://orcid.org/0000-0002-1199-9900>

**Contribution:** Nikulenkov A.M. – the concept and design of the study, collection and processing of materials, writing the text; Yeremin G.B. – the concept and design of the study, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article; Sindalovskiy L.N. – the concept and design of the study, collection and processing of materials, writing the text; Megorskiy V.V. – collection and processing of materials; Mozhukhina N.A., Borisova D.S., Buzinov R.V. – editing.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Acknowledgement.** The study had no sponsorship.

Received: April 28, 2023 / Accepted: June 7, 2023 / Published: October 9, 2023

## Введение

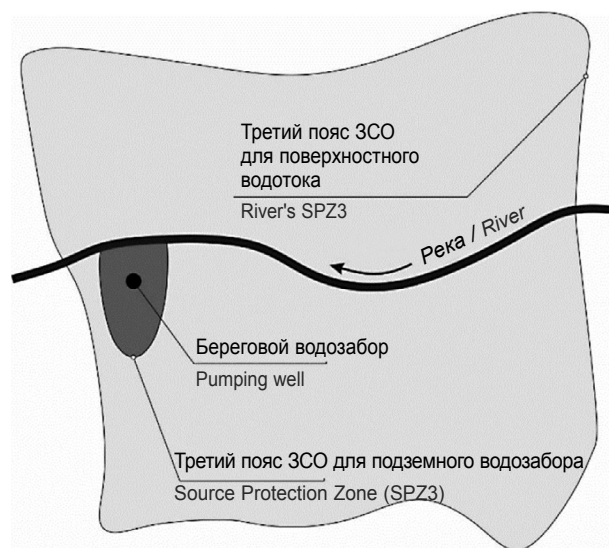
Обоснование установления зон санитарной охраны (ЗСО) источников водоснабжения связано с решением целого ряда методических задач [1–5]. Береговые водозаборы подземных вод – это один из наиболее распространённых типов водозаборов, который предполагает размещение скважины вблизи реки или водоёма. Соседство поверхностного водотока и скважины обладает рядом преимуществ, особенно если речь идёт о крупном городском водозаборе подземных вод. В речных долинах, как правило, аллювиальные отложения обладают высокими коэффициентами фильтрации. Это позволяет забирать значительный объём воды из ограниченного количества скважин при небольшом понижении уровней грунтовых вод. При работе берегового водозабора происходит привлечение не только подземных вод, но и ресурсов поверхностных вод, что также даёт возможность увеличить производительность водозабора. Во время фильтрации поверхностных вод через донные отложения и горные породы к скважине происходят сложные физико-химические преобразования на границе раздела фаз грунта и воды. Высокая сорбционная способность пород является причиной снижения в воде концентраций тяжёлых металлов, нефтепродуктов и многих других опасных веществ [6–9]. Кроме того, по мере движения поверхностной воды к скважине через грунты значительно сокращается микробная нагрузка [10–12]. Таким образом, береговой водозабор может выступать в роли природного фильтра для улучшения качества питьевой воды, привлекаемой из поверхностного водотока. Известны многие случаи, когда организация скважинных водозаборов на насыпных островах в русле реки приводила к значительному улучшению качества питьевых вод по сравнению с водой непосредственно из реки [13, 14].

К сожалению, наряду с преимуществами береговые водозаборы подземных вод обладают и некоторыми недостатками. Один из главных недостатков – трудности с прогнозом изменения качества питьевых вод в процессе эксплуатации водозабора. Проблема связана с тем, что химический состав привлекаемой береговым водозабором речной воды может достаточно быстро измениться в зависимости от техногенной нагрузки на территорию вверх по течению реки или при

возникновении каких-либо аварийных разливов или сбросов на акватории [15–17].

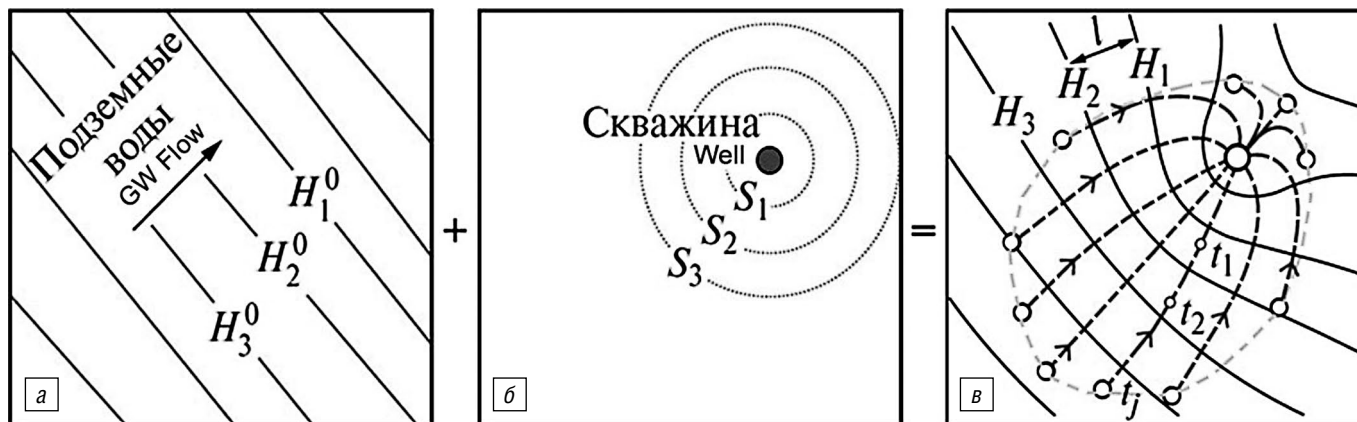
Для поддержания качества питьевых вод береговых водозаборов, согласно СанПиН 2.1.4.1110–02, предусмотрена организация ЗСО не только для подземного водозабора, но и для поверхностного водотока в том случае, если пояс ЗСО подземного водозабора замыкается на реку (рис. 1).

На практике такое требование СанПиН часто приводит к невозможности организации питьевого водоснабжения из берегового водозабора, поскольку размеры поясов ЗСО поверхностных водотоков значительно больше по площади, чем для подземных, и требуют введения обременений на обширные территории. В регионе с устоявшейся промышленной инфраструктурой ввести обременения на большие



**Рис. 1.** Береговой водозабор подземных вод и контуры его зон санитарной охраны (ЗСО).

**Fig. 1.** Coastal groundwater intake and its Wellhead protection area (WHPA) contours.



**Рис. 2.** Принцип графоаналитического метода расчёта ЗСО подземного водозабора: *a* – карта гидроизогипс до начала работы водозабора; *б* – карта понижений уровня воды на конец эксплуатации водозабора; *в* – результирующая карта гидроизогипс с учётом гидродинамического воздействия водозабора (суперпозиция рис. *a* и *б*). На карте *в* штриховыми линиями со стрелками отмечены линии тока, полые окружности – место, где время движения по линии тока до скважины составит 25 лет.

**Fig. 2.** The principle of the graphic-analytical method for calculating the WHPA of an underground water intake: *a* – map of hydroisohypses before the start of the water intake; *б* – map of water level decrease at the end of water intake operation; *в* – the resulting map of hydroisohypses, taking into account the hydrodynamic impact of water intake (superposition of figures *a* and *б*). On the map *в*, the broken lines with arrows mark the streamlines, the hollow circumferences indicate the place where the time of movement along the streamline to the well will be 25 years.

прибрежные территории зачастую не представляется возможным. Например, средняя скорость течения Енисея в районе Красноярска составляет 2 м/с. Второй и третий пояса ЗСО поверхностного водотока должны быть удалены вверх по течению реки на такое расстояние, чтобы загрязнение не дошло до водозабора в течение пяти суток. Несложно оценить, что площадь ЗСО поверхностного водотока в таких условиях вытягивается вверх по течению реки на расстояние более 850 км.

В настоящей статье рассматриваются способы обоснования сокращения ЗСО по акватории поверхностного водотока для береговых водозаборов подземных вод.

### Материалы и методы

Для оценки возможности сокращения поясов ЗСО береговых водозаборов использованы гидродинамические и геомиграционные аналитические решения. Расчёты проводили в программном комплексе АНСДИМАТ, разработанном в ИГЭ РАН [18, 19]. Программа имеет свидетельство о государственной регистрации ЭВМ № 2020617324 и получила положительное экспертное заключение от ФГБУ «НИИ ЭЧ и ГОС им. А.Н. Сусина» (ныне ФГБУ «ЦСП» ФМБА России). Рассмотрим основные аналитические зависимости, которые используются далее в расчётах.

Расчёт ЗСО береговых водозаборов в программе АНСДИМАТ выполняется графоаналитическим методом. Метод подробно описан в руководствах и научной литературе [20–23].

Суть метода заключается в поэтапном воссоздании сетки движения подземных вод с учётом гидродинамического влияния водозаборов и последующем расчёте времени движения инертных частиц по линиям тока к скважине (рис. 2).

Так, на первом этапе воссоздаётся естественная структура потока подземных вод до начала работы водозабора. На втором этапе проводится расчёт величины понижения подземных вод от работы скважинного водозабора в различных точках пространства. На третьем этапе из естественных абсолютных отметок уровней подземных вод вычитают рассчитанную величину понижения, что позволяет получить искажённую сетку движения подземных вод с учётом работы водозабора. По линиям тока через скорости рассчитываются времена добегания инертного загрязнения до водозабора на

период 25 лет [см. выражения (1) и (2)]. Такой алгоритм позволяет оконтурить буферную зону вокруг скважины, которая будет отождествляться с расчётным третьим поясом ЗСО.

$$v = \frac{1}{n} k \frac{H_2 - H_1}{l}, \tag{1}$$

где  $H_1, H_2$  – расчётный напор в точках 1 и 2, находящихся на расстоянии  $l$  друг от друга, м;  $k$  – коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут;  $l$  – расстояние между двумя точками (1 и 2), в которых определяется напор, м;  $n$  – пористость;  $v$  – действительная скорость фильтрации, м/сут.

По рассчитанным линиям тока и скоростям определяется время движения частицы для второго и третьего пояса ЗСО. Время прохождения частицы до водозабора выражается следующей суммой:

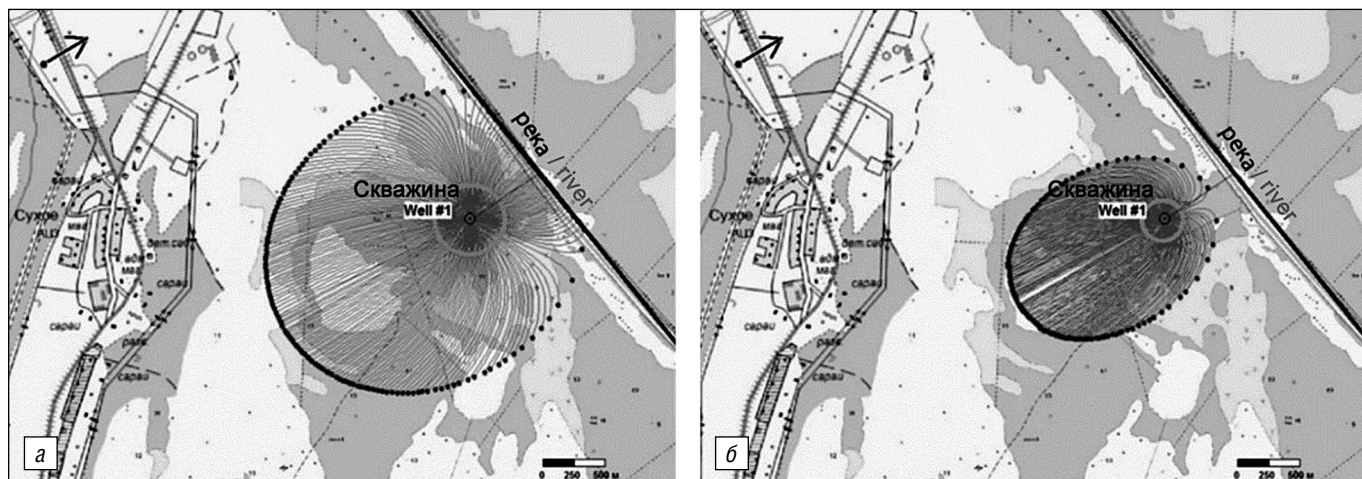
$$t = \sum_{i=1}^j \Delta t_i = \sum_{i=1}^j \frac{l_i}{v_i}, \tag{2}$$

где  $j$  – число интервалов, сумма которых равна длине траектории перемещения частицы за время  $t$ ;  $l_i$  – длина  $i$ -го интервала, м;  $t$  – время прохождения частицы от произвольной точки до водозабора, сут;  $t_i$  – время прохождения частицы от произвольной точки до окончания  $i$ -го интервала, сут;  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$  – время прохождения частицей одного  $i$ -го интервала, сут;  $v_i$  – действительная скорость фильтрации для  $i$ -го интервала, м/сут.

Возможность замыкания третьего пояса ЗСО подземного водозабора на реку определяется выражением (3) [21]. Из выражения видно, что величина нормированного расхода ( $\bar{Q}$ ) будет зависеть от расхода водозабора, расстояния до реки, коэффициента фильтрации пород, градиента потока и мощности водоносного горизонта. Если величина нормированного расхода будет больше или равна единице  $\bar{Q} \geq 1$ , то третий пояс ЗСО берегового водозабора замкнётся на реку. Если же  $\bar{Q} < 1$ , то ЗСО не замкнётся на реку (рис. 3).

$$\bar{Q} = \frac{q}{\pi X_0 k l m}, \tag{3}$$

где  $\bar{Q}$  – нормированный расход, –;  $Q$  – расход водозабора, м<sup>3</sup>/сут;  $X_0$  – расстояние от скважины до реки, м;  $k$  – коэффициент фильтрации, м/сут;  $l$  – градиент потока подземных вод, –;  $m$  – мощность водоносного горизонта, м.



**Рис. 3.** Варианты расположения третьего пояса ЗСО подземного водозабора вблизи реки: а – ЗСО замыкается на реку ( $\bar{Q} \geq 1$ ); б – ЗСО не замыкается на реку ( $\bar{Q} < 1$ ).

**Fig. 3.** Location options for the 3<sup>rd</sup> zone of the WHPA of the underground water intake near the river: а – on the left – WHPA closes on the river ( $\bar{Q} \geq 1$ ); б – WHPA does not close on the river ( $\bar{Q} < 1$ ).

**Результаты**

Рассмотрим подробнее структуру потока подземных вод в области между водозаборной скважиной и рекой на примере работы конкретного водозабора. Исходные параметры водозабора указаны в таблице. На рис. 4 показана естественная структура потока (до включения водозабора), а также нарушенная структура при различных производительностях водозабора ( $Q = 300, 500$  и  $1000$  м<sup>3</sup>/сут), который удалён от реки на 50 м в глубину материка. Как видно из рис. 4, а, направление естественного потока ориентировано на запад к реке с градиентом 0,01 м/мин. Коэффициент фильтрации составлял 10 м/сут, а мощность водоносного пласта 30 м.

При включении водозабора с расходом 300 м<sup>3</sup>/сут величина нормированного расхода ( $\bar{Q}$ ) будет меньше единицы [см. выражение (3)]. Это означает, что ЗСО водозабора не замкнётся на границу реки. Структура потока подземных вод для такого случая показана на рис. 4, б. Из рисунка видно, что между водозабором и рекой образуется водораздельная линия, которая не позволяет загрязнению из реки попасть в скважину ни при каких обстоятельствах. По мере увеличения расхода скважины водораздельная линия всё ближе сдвигается к реке и в какой-то момент пропадает (при  $\bar{Q} \geq 1$ ), то есть загрязнение из реки начинает поступать в водоносный пласт из реки и постепенно подтягиваться к водозабору (см. рис. 4, в, г).

Очевидно, что загрязнённая вода из реки не сразу попадает в водозабор, для этого ей понадобится некоторое время, а максимальная концентрация загрязнения в питьевой воде будет определяться балансом смешения в скважине привлечённой речной воды и естественного потока подземных вод (рис. 5).

Время начала поступления загрязнения из реки в водозабор ( $t_n$ ) и максимальную концентрацию загрязнения ( $\bar{C}_{max}$ ) для случая, когда поток направлен к реке и  $\bar{Q} \geq 1$ , можно оценить по решению (4) и (5) [24, 25] соответственно.

$$t_n = \frac{nR X_0}{kl} \left( \frac{\bar{Q}}{\bar{y}_{max}} \arctan \frac{1}{\bar{y}_{max}} - 1 \right), \tag{4}$$

$$\bar{C}_{max} = \frac{2}{\pi} \left( \arctan \bar{y}_{max} - \frac{\bar{y}_{max}}{\bar{Q}} \right), \tag{5}$$

$$\bar{y}_{max} = \sqrt{\bar{Q} - 1}, \tag{6}$$

$$R = 1 + \frac{k_d \rho_b}{n}, \tag{7}$$

где  $t_n$  – время поступления первых порций загрязнённой воды в подземный водозабор от момента начала загрязнения реки, сут;  $\bar{C}_{max}$  – максимальная величина относительной концентрации, – (считается, что концентрация в реке равна 1, а в водоносном пласте равна 0);  $\bar{y}_{max}$  – приведённая половина ширины области захвата реки, –;  $R$  – фактор сорбционной задержки, –;  $n$  – активная пористость, –;  $X_0$  – расстояние от скважины до реки, м;  $k$  – коэффициент фильтрации, м/сут;  $l$  – градиент потока подземных вод, –;  $\bar{Q}$  – нормированный расход, –;  $k_d$  – коэффициент сорбционного распределения, см<sup>3</sup>/г;  $\rho_b$  – плотность скелета породы, г/см<sup>3</sup>.

Подход к сокращению поясов ЗСО на поверхностном водотоке для береговых водозаборов подземных вод основан на расчёте степени разбавления ( $\bar{C}_{max}$ ) и времени миграции ( $t_n$ ) загрязнения от реки до водозабора подземных вод. Если время миграции ( $t_n$ ) загрязнения будет больше 400 сут, то организация второго пояса ЗСО на поверхностном водотоке теряет всякий смысл. Если время миграции окажется более 25 лет, то необходимость в третьем поясе на поверхностном водотоке также отпадает.

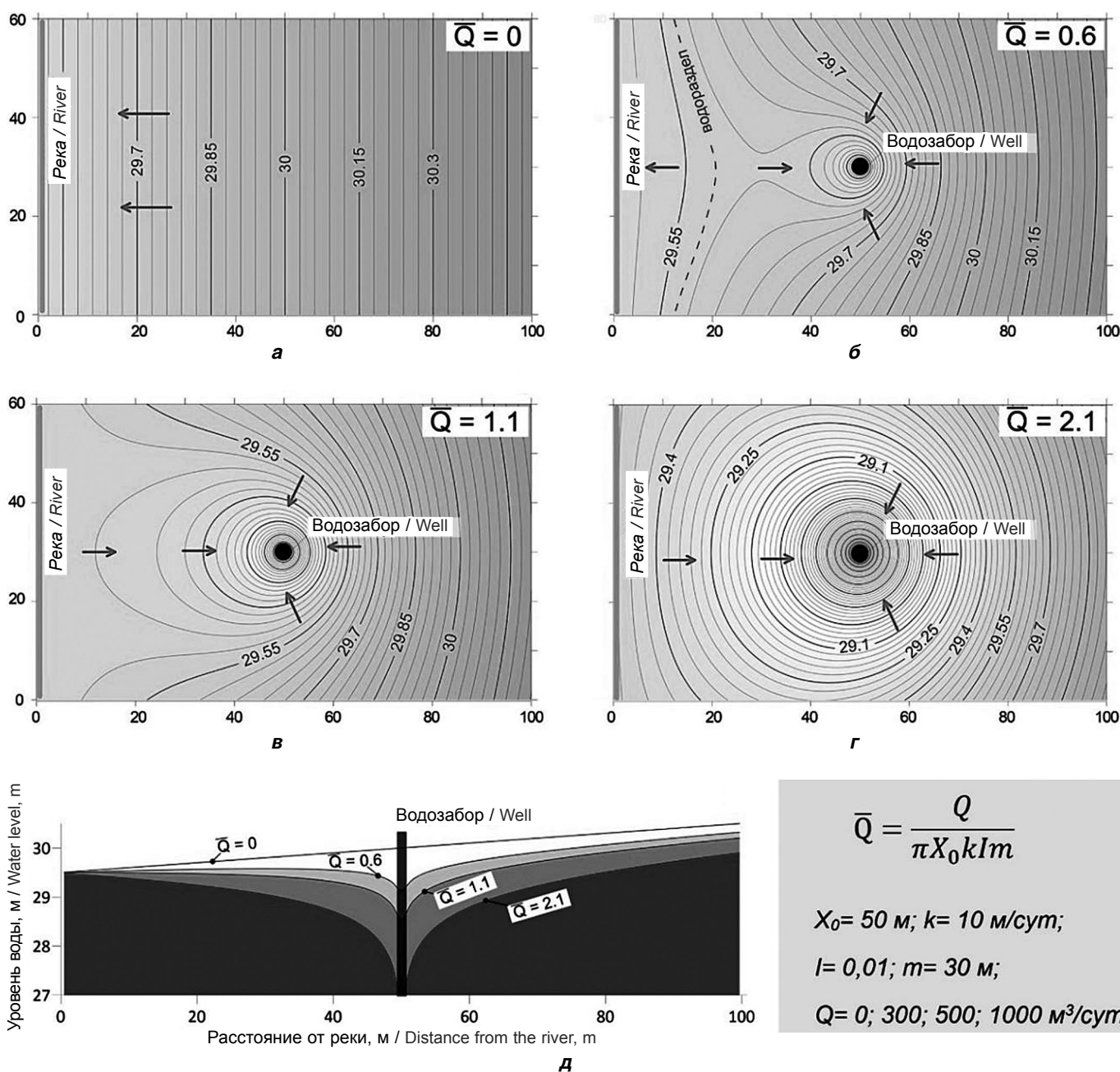
На примере конкретного водозабора попробуем оценить время миграции загрязнения от реки до водозабора и степень разбавления речных вод. Водозабор находится на расстоянии 50 м от реки. Естественный поток подземных вод направлен к реке. Основные характеристики водоносного горизонта приведены в таблице.

Время появления первых порций загрязнённых речных вод в водозаборе подземных вод можно оценить по уравнению (4), а максимальную относительную концентрацию – по уравнению (5). На рис. 6 приведены расчётное время и максимальные концентрации при различной производительности водозабора.

Хорошо видно, что загрязнение начнёт приходить к водозабору только в том случае, если его расход станет больше 471 м<sup>3</sup>/сут, то есть когда станет больше 1. Постепенное увеличение расхода приводит к сокращению времени миграции загрязнения от реки к скважине. Так, при расходе 538 м<sup>3</sup>/сут время миграции составит 400 сут. Следовательно, если расход водозабора не превышает этой величины, то организовывать второй пояс ЗСО на поверхностном водотоке не потребуется. При расходе 1000 м<sup>3</sup>/сут время миграции составит уже 77 сут, а при 10 000 м<sup>3</sup>/сут всего лишь 5 сут (согласно рис. 6).

**Принятые параметры для берегового водозабора подземных вод**  
**Accepted parameters for costal groundwater intake**

Параметр Parameter	Обозначение Subscript	Размерность Dimension	Величина Size
Расстояние от реки до скважины / Distance from the river to the well, m	$X_0$	м (m)	50
Градиент фильтрационного потока / Filtration flow gradient	$I$	м/м (m/min)	0.01
Мощность водоносного горизонта / Aquifer power	$m$	м (m)	30
Коэффициент фильтрации / Filtration coefficient	$k$	м/сут (m/day)	10
Расход водозабора / Water intake flow	$Q$	м <sup>3</sup> /сут (m <sup>3</sup> /day)	0, 300, 500, 1000 ...
Активная пористость / Active porosity	$n$		0.3



**Рис. 4.** Структура потока подземных вод при работе водозабора вблизи реки при различных расходах.

**Fig. 4.** The structure of the groundwater flow during the operation of a water intake near the river at various flow rates.

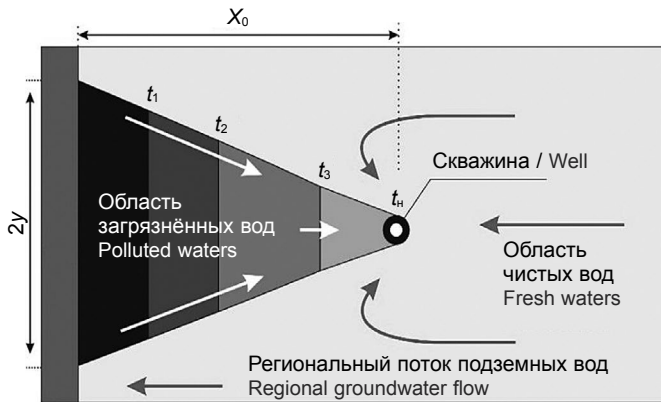


Рис. 5. Концептуальная схема подтягивания и разбавления загрязнённых речных вод береговым водозабором.

Fig. 5. Conceptual scheme for pulling up and diluting polluted river waters by coastal water intake.

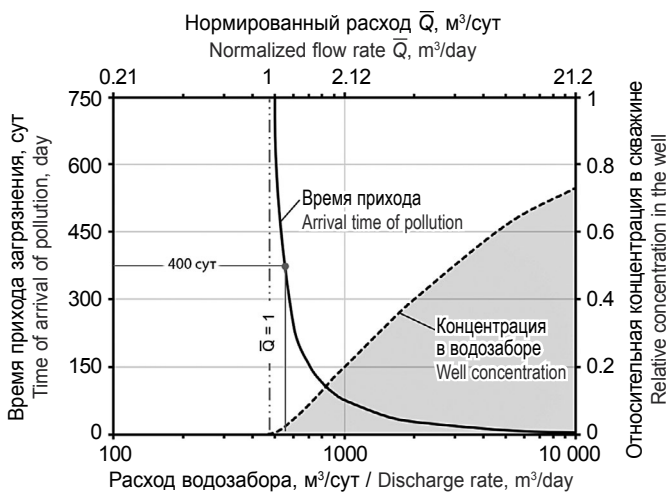


Рис. 6. Расчётное время появления загрязнения в водозаборе и его концентрация при различной производительности водозабора.

Fig. 6. Estimated time of occurrence of pollution in the water intake and its concentration at different water intake productivity.

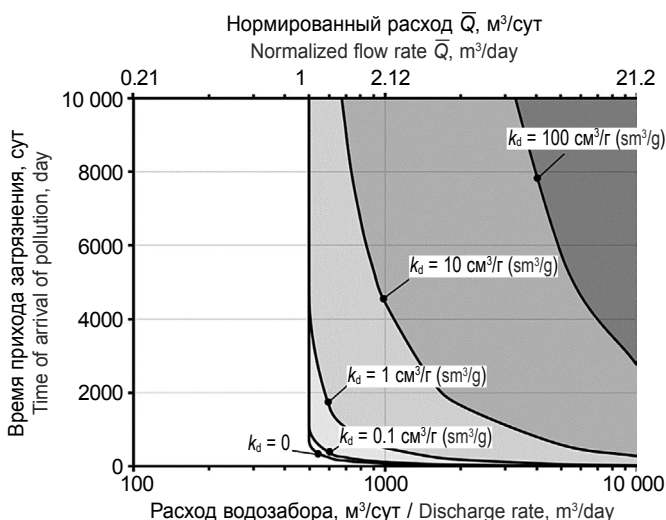


Рис. 7. Зависимость времени прихода первых порций загрязнённых речных вод к береговому водозабору подземных вод от сорбционной способности вмещающих пород.

Fig. 7. Dependence of the time of arrival of the first portions of polluted river waters to the coastal groundwater intake from the sorption capacity of host rocks.

Важно отметить, что качество воды в водозаборе будет определяться не только временем миграции загрязнения от реки до скважины, но и степенью разбавления речных вод подземными. На рис. 6 представлен расчёт относительной концентрации воды в водозаборе при его различной производительности. Считалось, что концентрация загрязнения в речной воде постоянна и равняется 1, а в подземной равна 0. Тогда расчётная величина относительной концентрации показывает долю речной воды в общем объёме водозабора. Хорошо видно, что, например, при расходе водозабора 1000 м³/сут он будет привлекать лишь только 20% речной воды. Следовательно, при таком расходе концентрации загрязняющих компонентов в реке могут превышать ПДК до пяти раз, и это не приведёт к превышению ПДК в воде собственно берегового водозабора.

Необходимо также учитывать, что представленные выше результаты расчётов справедливы для инертного загрязнения. На практике наиболее распространёнными загрязнителями подземных вод являются тяжёлые металлы, нефтепродукты, нитраты. Эти компоненты не являются инертными и вступают в физико-химические взаимодействия с вмещающей породой в процессе миграции. Один из наиболее важных процессов – адсорбция вещества на породе, которая может быть выражена через коэффициент сорбционного распределения  $k_d$  [см. уравнение (7)]. Чем больше сорбционная способность породы по отношению к конкретному загрязнению, тем медленнее оно мигрирует в водоносном горизонте.

На рис. 7 представлено расчётное время прихода загрязнения речных вод в водозабор для компонентов, обладающих различными сорбционными свойствами по отношению к вмещающим породам. Например, для значения  $k_d = 100 \text{ см}^3/\text{г}$  (характерно для меди) время прихода загрязнения составит 10 000 сут при расходе 3200 м³/сут.

### Обсуждение

При проектировании берегового водозабора подземных вод и разработке проекта ЗСО можно рекомендовать определённую последовательность действий, чтобы сократить или вовсе уйти от организации ЗСО на поверхностном водотоке.

1. Расположить береговой водозабор подземных вод таким образом, чтобы третий пояс ЗСО не замыкался на поверхностный водоток, то есть нормированный расход  $\bar{Q}$  должен быть меньше 1 [см. уравнение (3)]. Уменьшить величину нормированного расхода  $\bar{Q}$  можно на этапе проектирования путём отдаления скважины от береговой линии или распределением дебита водозабора между несколькими скважинами.

2. Если не удастся выполнить условие  $\bar{Q} < 1$ , то следует оценить время миграции загрязнённой речной воды ( $t_n$ ) до водозаборной скважины [см. уравнение (4)]. Если время миграции будет больше 400 сут, можно отказаться от организации второго пояса ЗСО на поверхностном водотоке, а если время миграции загрязнения будет более 25 лет, то можно отказаться и от третьего пояса. При расчётах времени миграции рекомендуется учитывать сорбционную способность донных отложений и вмещающих горных пород, что позволяет многократно увеличить время миграции загрязнения от реки до водозаборной скважины.

3. Качество воды подземного берегового водозабора зависит не только от времени миграции загрязнённых речных вод к скважине, но и от доли привлекаемых речных вод. Суммарный расход подземного берегового водозабора складывается из привлекаемой речной воды и подземной воды. Оценить долю привлечённых некондиционных вод можно по уравнению (5). Согласно уравнению, даже при постоянном превышении ПДК в речных водах возможно обосновать такой расход скважины, который не приведёт к превышению ПДК в воде водозабора.

4. Если величина нормированного расхода подземного берегового водозабора больше или равна 1 ( $Q \geq 1$ ), время миграции загрязнённых речных вод до скважины менее 400 сут, а привлекаемый объём речной воды составляет существенную долю в общем расходе водозабора, необходимо организовать пояса ЗСО как для подземного водозабора, так и для поверхностного водотока.

## Заключение

Учёт представленных рекомендаций при разработке подземных береговых водозаборов позволяет использовать все преимущества береговых водозаборов и при этом не выводить из хозяйственного использования большие территории.

## Литература

(п.п. 6, 7, 10, 12, 15–18 см. References)

1. Еремин Г.Б., Никуленков А.М., Носков С.Н., Мозжухина Н.А., Вилькина М.В. Проблемы обоснования зон санитарной охраны подземных водозаборов: анализ основных геологических факторов. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(8): 762–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-8-762-768> <https://elibrary.ru/rperiz>
2. Горбанев С.А., Никуленков А.М., Еремин Г.Б., Башкетова Н.С., Бадаева Е.А., Ломтев А.Ю. Проблемы проектирования и санитарно-эпидемиологической экспертизы проектов зон санитарной охраны подземных источников водоснабжения. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(12): 1152–6. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-12-1152-1156> <https://elibrary.ru/ysjzjz>
3. Еремин Г.Б., Бадаева Е.А., Носков С.Н., Башкетова Н.С., Фридман К.Б., Карелин А.О. и др. Современные проблемы применения санитарных правил и норм организации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(12): 1157–61. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-12-1157-1161> <https://elibrary.ru/ysjka>
4. Карелин А.О., Ломтев А.Ю., Еремин Г.Б., Мозжухина Н.А. Зоны санитарной охраны водоисточников. *Экология производства*. 2016; (5): 36–40.
5. Лопатин С.А., Редько А.А., Терентьев В.И. Особенности установления зон санитарной охраны водоисточника. *Гигиена и санитария*. 2014; 93(3): 16–20. <https://elibrary.ru/sjsxnx>
6. Веницианов Е.В., Лепехин А.П. *Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах*. Екатеринбург; 2002.
7. Савостикова О.Н., Мамонов Р.А., Тюрин И.А., Алексеева А.В., Николаева Н.И. Ксенобиотики и продукты их трансформации в сточных водах (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2021; 100(11): 1218–23. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-11-1218-1223> <https://elibrary.ru/fivvue>
8. Борисова Д.С., Никуленков А.М., Еремин Г.Б., Мозжухина Н.А., Ломтев А.Ю., Бадаева Е.А. К вопросу миграции патогенных микроорганизмов из источников загрязнения в зонах санитарной охраны подземных источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. Обзор литературы. *Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения*. 2020; 15(1): 342–59. <https://elibrary.ru/gncixs>
9. Справочное пособие к СНиП 2.04.02–84. Проектирование сооружений для забора поверхностных вод. М.: Стройиздат; 1990.
10. Самарцев В.Н., Поздняков С.П. Опыт калибровки геофильтрационной модели берегового водозабора путем совместного использования данных опытно-фильтрационных работ и результатов мониторинга в период эксплуатации. *Инженерная геология*. 2017; (3): 36–43. <https://elibrary.ru/zewafn>
11. Синдаловский Л.Н. *Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT*. СПб.: Наука; 2021.
12. Минкин Е.Л. *Гидрогеологические расчеты для выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод*. М.: Недра; 1967.
13. Ораловская А.Е., Лапшин Н.Н. *Санитарная охрана водозаборов подземных вод*. М.: Недра; 1987.
14. Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ 2-го и 3-го поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. М.; 1983.
15. Еремин Г.Б., Никуленков А.М., Борисова Д.С., Мозжухина Н.А. *Гигиеническая безопасность подземных источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. Зоны санитарной охраны*. СПб.: Наука; 2022.
16. Гольдберг В.М. *Гидрогеологические прогнозы качества подземных вод на водозаборах*. М.: Недра; 1976.
17. Румынин В.Г. *Теория и методы изучения загрязнения подземных вод*. СПб.: Наука; 2020.

## References

1. Eremin G.B., Nikulenkov A.M., Noskov S.N., Mozhukhina N.A., Vil'kina M.V. Delineation of wellhead protection zones: the analysis of main geological factors. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(8): 762–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-8-762-768> <https://elibrary.ru/rperiz> (in Russian)
2. Gorbanev S.A., Nikulenkov A.M., Eremin G.B., Bashketova N.S., Badaeva E.A., Lomtev A.Yu. Problems of designing and sanitary-epidemiologic expertise of projects of sanitary protection zones of underground water supply sources. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018; 97(12): 1152–6. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-12-1152-1156> <https://elibrary.ru/ysjzjz> (in Russian)
3. Eremin G.B., Badaeva E.A., Noskov S.N., Bashketova N.S., Fridman K.B., Karelin A.O., et al. Modern problems of the application of sanitary rules and norms on the organization of sanitary protection zones of water supply sources and water pipes for drinking purposes. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018; 97(12): 1157–61. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-12-1157-1161> <https://elibrary.ru/ysjka> (in Russian)
4. Karelin A.O., Lomtev A.Yu., Eremin G.B., Mozhukhina N.A. Zones of sanitary protection of water sources. *Ekologiya proizvodstva*. 2016; (5): 36–40. (in Russian)
5. Lopatin S.A., Red'ko A.A., Terent'ev V.I. The features of the establishment of zones of sanitary protection of the water source. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2014; 93(3): 16–20. <https://elibrary.ru/sjsxnx> (in Russian)
6. WHO. Schmoll O., Howard G., Chilton J., Chorus I., eds. *Protecting Groundwater for Health: Managing the Quality of Drinking Water Sources*. Geneva, London: IWA Publishing; 2006.
7. Scozzari A., Dotsika E., eds. *Threats to the Quality of Groundwater Resources. Prevention and Control. (The Handbook of Environmental Chemistry)*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2016.
8. Venitsianov E.V., Lepekhin A.P. *Physical and Chemical Bases of Modeling of Migration and Transformation of Heavy Metals in Natural Waters [Fiziko-khimicheskie osnovy modelirovaniya migratsii i transformatsii tyazhelykh metallov v prirodnykh vodakh]*. Ekaterinburg; 2002. (in Russian)
9. Savostikova O.N., Mamonov R.A., Tyurina I.A., Alekseeva A.V., Nikolaeva N.I. Xenobiotics and products of their transformation in wastewater (literature review). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(11): 1218–23. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-11-1218-1223> <https://elibrary.ru/fivvue> (in Russian)
10. WHO. Guidelines for drinking-water quality: first addendum to the fourth edition. London: IWA Publishing; 2017.
11. Borisova D.S., Nikulenkov A.M., Eremin G.B., Mozhukhina N.A., Lomtev A.Yu., Badaeva E.A. On the issue of pathogenic microorganisms migration from sources of pollution in sanitary protection zones of underground drinking and household water supply sources. Literature review. *Zdorov'e – osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ikh resheniya*. 2020; 15(1): 342–59. <https://elibrary.ru/gncixs> (in Russian)
12. Buchan G.D. *Pathogens: Transport by Water. Encyclopedia of Water Science*. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2008: 808–11.
13. Reference guide to SNiP 2.04.02–84. Design of structures for surface water intake. Moscow: Stroyizdat; 1990. (in Russian)
14. Samartsev V.N., Pozdnyakov S.P. Experience in calibrating a geofiltration model of a coastal water intake by sharing experimental filtration data and monitoring results during the operation period. *Inzhenernaya geologiya*. 2017; (3): 36–43. <https://elibrary.ru/zewafn> (in Russian)
15. Nwanosike A.A., Olashinde P.I., Yisa J., Okosun E.A., Nwankwoala H.O., Alkali Y.B. Geostatistical assessment of groundwater quality from coastal aquifers of Eastern Niger Delta, Nigeria. *Geosciences*. 2012; 2(3): 51–9.
16. Faye S., Maloszewski P., Stichler W., Trimbom P., Cissé Faye S., Bécaye Gaye C. Groundwater salinization in the Saloum (Senegal) delta aquifer using minor elements and isotopic indicators. *Sci. Total Environ*. 2005; 343(1–3): 243–59. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.10.001>
17. Vives L., Varni M., Usunoff E. Behaviour of the freshwater and saltwater phases in an urban area in Western Buenos Aires Province, Argentina. *Hydrogeology J*. 2005; (13): 426–35.
18. Sindalovskiy L.N. *Aquifer Test Solutions*. Springer; 2017.
19. Sindalovskiy L.N. *Hydrogeological Calculations Using the ANSDIMAT Program [Gidrogeologicheskie raschety s ispol'zovaniem programmy ANSDIMAT]*. St. Petersburg: Nauka; 2021. (in Russian)
20. Minikin E.L. *Hydrogeological Calculations for the Allocation of Zones of Sanitary Protection of Groundwater Intakes [Gidrogeologicheskie raschety dlya vydeleniya zon sanitarnoy okhrany vodozaborov podzemnykh vod]*. Moscow: Nedra; 1967. (in Russian)
21. Oralovskaya A.E., Lapshin N.N. *Sanitary Protection of Groundwater Intakes [Sanitarnaya okhrana vodozaborov podzemnykh vod]*. Moscow: Nedra; 1987. (in Russian)
22. Recommendations for Hydrogeological Calculations to Determine the Boundaries of the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> Belts of the Sanitary Protection Zones of Underground Sources of Domestic and Drinking Water Supply. Moscow; 1983. (in Russian)
23. Eremin G.B., Nikulenkov A.M., Borisova D.S., Mozhukhina N.A. *Hygienic Safety of Underground Sources of Drinking and Household Water Supply. Zones of Sanitary Protection [Gigienicheskaya bezopasnost' podzemnykh istochnikov pit'evogo i khozyaystvenno-bytovogo vodosnabzheniya. Zony sanitarnoy okhrany]*. St. Petersburg: Nauka; 2022. (in Russian)
24. Gol'dberg V.M. *Hydrogeological Forecasts of Groundwater Quality at Water Intakes [Gidrogeologicheskie prognozy kachestva podzemnykh vod na vodozaborakh]*. Moscow: Nedra; 1976. (in Russian)
25. Rummyin V.G. *Theory and Methods of Studying Groundwater Pollution. Textbook for High Schools [Teoriya i metody izucheniya zagryazneniya podzemnykh vod. Uchebnik dlya vuzov]*. St. Petersburg: Nauka; 2020. (in Russian)