

УДК 550.42

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-145-152

ФТОР В ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Алла Витальевна Савенко¹, Виталий Савельевич Савенко²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alla_savenko@rambler.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vitaly_savenko@rambler.ru

Аннотация. Определено содержание фтора в речных и пресных подземных водах Юго-Восточного Беломорья, являющегося зоной сопряжения Мезенской синеклизы и Балтийского щита. Установлено, что обследованные воды характеризуются низким содержанием фтора, сильно отличающимся от физиологически оптимального диапазона, за исключением вод из скважины 27 в долине р. Золотицы. Уровень концентраций фтора близок к таковому для вод питьевого назначения смежных территорий Архангельской области с иной литогенной основой. Это позволяет предположить определяющую роль климатического фактора в распространности фтора в поверхностных и пресных подземных водах региона — действующих и потенциальных источниках питьевого водоснабжения.

Ключевые слова: фтор, речные воды, пресные подземные воды, химический состав, питьевое водоснабжение, Архангельская область

Для цитирования: Савенко А.В., Савенко В.С. Фтор в поверхностных и пресных подземных водах Архангельской области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 145–152.

FLUORINE IN SURFACE AND FRESH GROUNDWATER OF THE ARKHANGELSK REGION

Alla V. Savenko¹, Vitaly S. Savenko²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alla_savenko@rambler.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vitaly_savenko@rambler.ru

Abstract. The fluorine content in river and fresh groundwater of the South-Eastern White Sea area, which is the conjugation zone of the Mezen syncline and the Baltic Shield, was determined. It was established that the studied waters are characterized by a low fluorine content, very different from the physiologically optimal range, with the exception of waters from well 27 in the Zolotitsa River valley. The level of fluorine concentrations is close to that for drinking water in adjacent territories of the Arkhangelsk Region with a different lithogenic base. This suggests the determining role of the climatic factor in the fluorine prevalence in surface and fresh groundwater in the region, which serves as current and potential sources of drinking water supply.

Keywords: fluorine, river water, fresh groundwater, chemical composition, drinking water supply, Arkhangelsk Region

For citation: Savenko A.V., Savenko V.S. Fluorine in surface and fresh groundwater of the Arkhangelsk Region. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 145–152 (In Russ.).

Введение. Фтор влияет на функционирование и развитие любых форм жизни на Земле: человека, животных, растений и микроорганизмов [Weinstein, Davison, 2004; Агалакова, Гусев, 2011; Иорданишвили, 2019]. В основе столь широкого проявления физиологических функций фтора, по-видимому, лежит «биохимический изоморфизм» гидроксил- и фторид-ионов, обусловленный близостью их физико-химических свойств, включая размер и склонность к комплексообразованию. Например, в результате образования прочных комплексных соединений фтор контролирует активность многочисленных ферментов, содержащих магний, кальций и железо [Агалакова, Гусев, 2011; Горностаева, Фукс, 2017; Жукова и др., 2017]. Недостаток и избыток фтора в организме человека относительно оптимума приводит к возникновению двух групп заболеваний,

называемых соответственно гипо- и гиперфторозами [Авцын и др., 1991]. Для их предотвращения концентрация фтора в питьевой воде — основном источнике усвояемого фтора — должна соответствовать санитарно-гигиеническим требованиям, находясь в интервале от 0,7 до 1,5 мг/л [СанПиН..., 2021]. Очевидно, что содержание фтора в поверхностных и подземных водах питьевого назначения является важной эколого-гигиенической характеристикой окружающей среды.

Несмотря на то, что распространенность фтора в водах питьевого назначения послужила предметом многочисленных исследований, например [Габович, Минх, 1979; Сазонов, 2000; Янин, 2007; Edmunds, Smedley, 2013; Ali et al., 2016; Fuge, 2019], до сих пор остается ряд недостаточно изученных в этом отношении территорий, в том числе обширные площади

Российской Арктики, хозяйственное освоение которых в настоящее время идет нарастающими темпами. Цель настоящей работы заключалась в определении современного содержания фтора в речных и пресных подземных водах Юго-Восточного Беломорья, а также фторидного эколого-гигиенического статуса поверхностных и пресных подземных вод Архангельской области — действующих и потенциальных источников питьевого водоснабжения.

Материалы и методы исследований. Характеристика объектов исследований. Юго-Восточное Беломорье расположено в пределах Беломорско-Кулойского плато и Архангельской низины и представляет собой северо-западную часть Северо-Двинского артезианского бассейна (Мезенской синеклизы в зоне ее сопряжения с Балтийским щитом). Протекание процессов осадконакопления и денудации в условиях сильной геодинамической активности этой территории, а также опускание восточных и поднятие западных частей Мезенской синеклизы при отсутствии четко выраженных водоупоров между водоносными горизонтами способствовало проникновению инфильтрационных вод на значительные глубины и привело к формированию как пресных, так и минерализованных вод во вмещающих породах разных возрастов [Малов, 2003; Malov, 2018].

В качестве материала для исследования были использованы пробы поверхностных и пресных подземных вод Юго-Восточного Беломорья, отобранные по нашей просьбе в 2012–2014 гг. сотрудником ФИЦ комплексного изучения Арктики УрО РАН А.И. Маловым. Обследовались реки Золотица, Белая, устьевой участок Северной Двины, а также четвертичные, каменноугольные, кимберлитовые и вендские водоносные горизонты с несколькими повторностями для большинства точек (скважин), расположение которых показано на рис. 1.

Методы исследований. Вначале, до контакта с атмосферой измеряли величину рН отобранных вод, после чего отфильтровывали их через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм и помещали в герметично закрывающиеся полипропиленовые пробирки объемом 50 мл для лабораторных анализов. Содержание фтора определяли методом прямой потенциометрии с фторидным ионоселективным электродом «Элит-221» и хлорсеребряным электродом сравнения в присутствии ацетатного солевого буфера [Савенко, 1986]; концентрации главных катионов, хлоридов и сульфатов — методом капиллярного электрофореза [Комарова, Каменцев, 2006], щелочность $\text{Alk} \approx \text{HCO}_3^-$ — объемным ацидиметрическим методом. Погрешность измерений не превышала 0,05 рН, $\pm 2\%$ для фтора и $\pm 3\%$ для компонентов основного солевого состава. Предел обнаружения фтора составил 0,02 мг/л.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты определений величины рН, содержания фтора и компонентов основного солевого состава в речных и пресных подземных водах Юго-Восточ-

ного Беломорья представлены в табл. 1. Концентрация фтора в речных водах изменяется от 0,05 до 0,18 мг/л, причем среднее значение для устьевого участка Северной Двины (0,13 мг/л) заметно превышает таковое для малых рек Золотицы и Белой (0,09 и 0,07 мг/л). Причина отмеченных различий, по-видимому, состоит в том, что водосборы указанных малых рек в целом расположены севернее по сравнению с водосбором Северной Двины, а с возрастанием суровости климата интенсивность процессов мобилизации растворенных веществ должна уменьшаться.

Средние концентрации фтора в пресных подземных водах из разных водоносных горизонтов близки между собой и находятся в интервале $0,19 \pm 0,03$ мг/л при общем диапазоне наблюдаемых значений 0,05–0,41 мг/л. Только в одной точке вендского водоносного горизонта (скважина 27) содержание фтора составляет 1,16 (0,97–1,35) мг/л, достигая эколого-гигиенического оптимума. По величине рН и ионному составу, за исключением небольшого превышения концентраций бикарбонатов и натрия, воды из скважины 27 не выходят за характерные для венда пределы, однако, по данным [Malov, 2024], помимо фтора, они также сильно обогащены бором и молибденом. Возможно, указанная аномалия связана с расположением вблизи точки пробоотбора рудопроявлений, что нуждается в дополнительном изучении.

Вычисленные для всего массива данных коэффициенты корреляции содержания фтора с величиной рН и концентрациями компонентов основного солевого состава (табл. 2) показывают слабую положительную связь фтора с рН ($r = 0,65$), минерализацией ($r = 0,60$) и бикарбонатами ($r = 0,65$). Значимость корреляций фтора с натрием, калием, хлоридами и сульфатами еще меньше, а с магнием и кальцием близка к нулю. Отсутствие тесной взаимосвязи концентраций фтора и других растворенных компонентов может быть обусловлено тем, что в настоящей работе обследовались разнородные водные объекты. Это предположение частично подтверждается расчетом аналогичных корреляционных связей для отдельных типов вод (см. табл. 2). Так, в речных водах содержание фтора плотно положительно коррелирует с минерализацией и концентрациями компонентов основного солевого состава. В водах четвертичных водоносных горизонтов такая же плотная, но отрицательная корреляция проявляется между фтором, с одной стороны, и хлоридами, сульфатами, натрием и калием, с другой. В водах каменноугольных водоносных горизонтов фтор, наоборот, тесно положительно связан с рН, минерализацией и всеми компонентами основного солевого состава, исключая хлориды. Однако в подземных водах венда корреляционные связи фтора выражены слабо: наибольшее значение коэффициента корреляции $r = 0,64$ наблюдается между фтором и бикарбонатами. Поскольку пробы из вендского водоносного

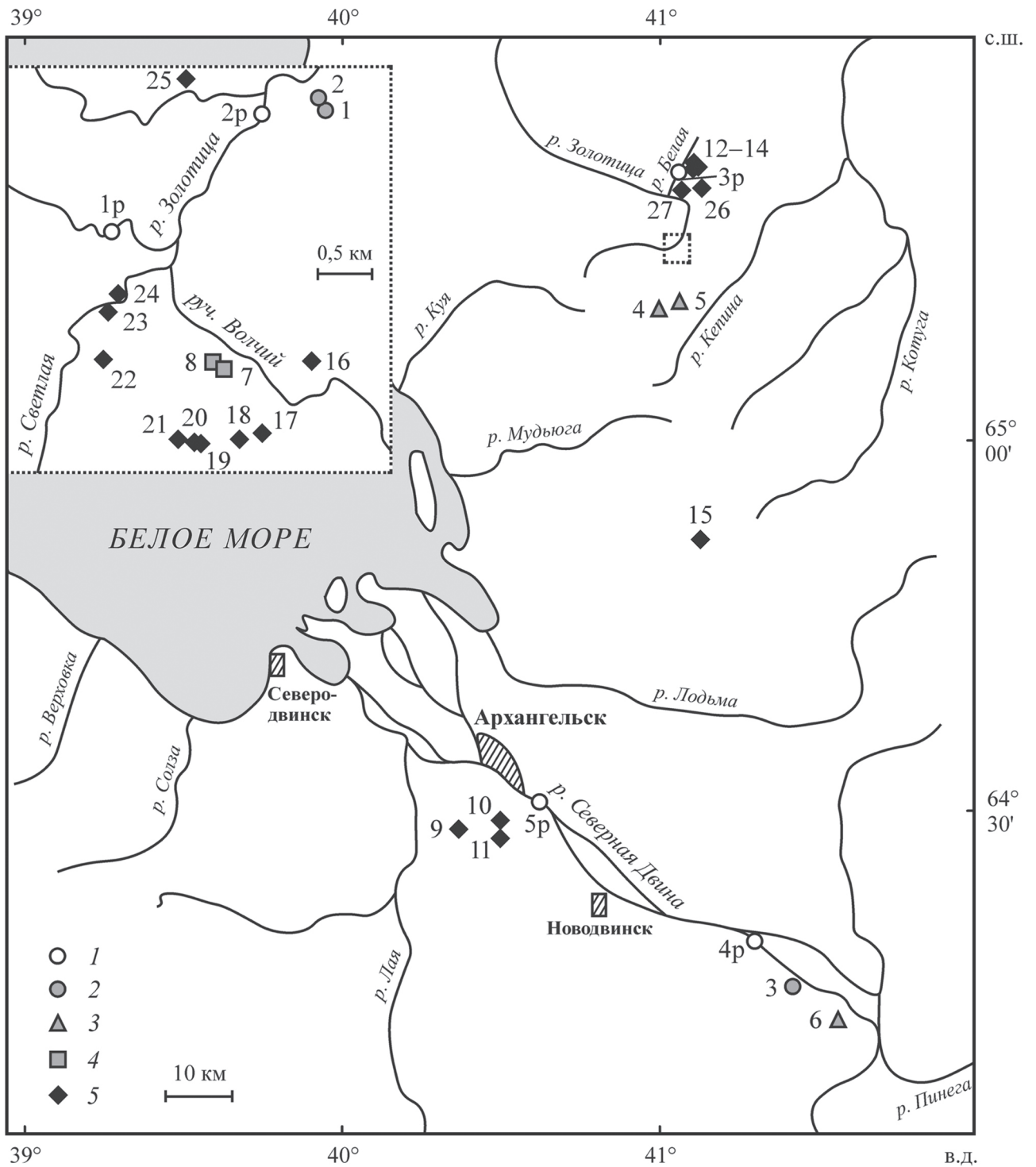


Рис. 1. Расположение мест отбора проб (и их номера) речных (1) и пресных подземных вод четвертичных (2), каменноугольных (3), кимберлитовых (4) и вендских (5) водоносных горизонтов на территории Юго-Восточного Беломорья в 2012–2014 гг.

горизонта составляют более 2/3 общего количества проанализированных образцов, именно они формируют общую картину корреляционных зависимостей. Тем не менее, неоднократно отмечавшаяся в литературе тенденция увеличения концентрации фтора с ростом pH все же прослеживается (рис. 2).

Установленные низкие концентрации фтора в речных и пресных подземных водах Юго-Восточного Беломорья согласуются с определениями

этого элемента в водах крупных и средних рек Юго-Восточного побережья Белого моря, а также в малых реках и грунтовых водах юга Архангельской области (табл. 3). Таким образом, имеются все основания утверждать, что содержание фтора в поверхностных и подземных водах Архангельской области, потенциально пригодных для питьевого водоснабжения, в несколько раз меньше нижнего предела эколого-гигиенического оптимума. Отсю-

Таблица 1

**Величины рН, минерализации, содержание фтора и компонентов основного солевого состава
в речных и пресных подземных водах Юго-Восточного Беломорья**

| Номер точки или скважины* / глубина, м | Дата отбора | рН | Минерализация М, мг/л | Концентрации в растворе, мг/л | | | | | | | |
|--|-------------|------|-----------------------|-------------------------------|------|-----------------|------------------|------|------|------|------|
| | | | | F | Cl | SO ₄ | HCO ₃ | Na | K | Mg | Ca |
| Речные воды | | | | | | | | | | | |
| 1р (R1) / 0,1 | 04.2013 | 7,53 | 77,0 | 0,05 | 5,41 | 2,94 | 50,3 | 7,85 | 0,62 | 4,16 | 5,67 |
| | 05.2014 | 7,50 | 84,5 | 0,07 | 8,22 | 4,20 | 48,8 | 13,3 | 0,80 | 3,12 | 6,06 |
| | 09.2014 | 7,60 | 185 | 0,11 | 16,9 | 6,93 | 111 | 26,4 | 1,27 | 7,39 | 15,1 |
| 2р (R2) / 0,1 | 04.2013 | 7,85 | 196 | 0,06 | 16,8 | 9,13 | 122 | 29,5 | 1,67 | 7,91 | 9,19 |
| | 04.2014 | 7,80 | 136 | 0,08 | 19,0 | 8,35 | 68,6 | 26,3 | 1,13 | 4,54 | 8,14 |
| | 05.2014 | 7,70 | 181 | 0,11 | 22,4 | 11,2 | 97,6 | 29,3 | 1,24 | 6,20 | 13,2 |
| | 09.2014 | 7,70 | 380 | 0,18 | 74,1 | 24,2 | 162 | 82,5 | 2,68 | 11,9 | 23,0 |
| 3р (R3) / 0,1 | 04.2013 | 7,70 | 151 | 0,07 | 5,70 | 5,82 | 108 | 3,31 | 1,15 | 12,1 | 14,6 |
| 4р / 0,1 | 04.2014 | 7,70 | 141 | 0,08 | 24,6 | 10,1 | 68,6 | 24,6 | 1,06 | 4,39 | 8,03 |
| | 05.2014 | 7,60 | 193 | 0,14 | 25,1 | 11,3 | 104 | 30,7 | 1,29 | 6,68 | 14,1 |
| | 09.2014 | 7,70 | 367 | 0,17 | 70,2 | 23,6 | 160 | 76,5 | 2,51 | 11,3 | 22,6 |
| 5р / 0,1 | 04.2014 | 7,50 | 145 | 0,08 | 26,7 | 10,7 | 67,9 | 26,0 | 1,08 | 4,61 | 8,32 |
| | 05.2014 | 7,50 | 185 | 0,11 | 25,4 | 10,3 | 96,1 | 30,9 | 1,31 | 6,73 | 14,8 |
| | 09.2014 | 7,60 | 363 | 0,18 | 69,4 | 23,4 | 159 | 75,7 | 2,43 | 11,2 | 22,0 |
| Среднее | | 7,64 | 199 | 0,11 | 29,3 | 11,6 | 102 | 34,5 | 1,45 | 7,30 | 13,2 |
| Подземные воды четвертичных водоносных горизонтов | | | | | | | | | | | |
| 1 (8q) / 20 | 05.2014 | 7,80 | 233 | 0,18 | 12,4 | 12,0 | 154 | 24,0 | 2,23 | 9,57 | 19,1 |
| 2 (9q) / 20 | 05.2014 | 7,70 | 272 | 0,22 | 28,7 | 14,2 | 156 | 37,2 | 3,22 | 10,4 | 22,6 |
| 3 (II) / 20 | 09.2013 | 7,80 | 793 | 0,11 | 237 | 81,5 | 214 | 177 | 5,57 | 31,8 | 46,0 |
| | 04.2014 | 7,80 | 463 | 0,21 | 3,26 | 26,3 | 322 | 9,15 | 2,28 | 33,6 | 66,5 |
| Среднее | | 7,78 | 440 | 0,18 | 70,3 | 33,5 | 212 | 61,8 | 3,33 | 21,3 | 38,6 |
| Подземные воды каменноугольных водоносных горизонтов | | | | | | | | | | | |
| 4 (2o) / 20 | 05.2014 | 7,50 | 171 | 0,10 | 5,35 | 4,77 | 122 | 7,28 | 0,35 | 11,3 | 20,1 |
| 5 (3u) / 40 | 05.2014 | 7,70 | 285 | 0,11 | 8,11 | 11,9 | 196 | 23,6 | 1,35 | 15,1 | 28,5 |
| 6 (Mk) / 40 | 09.2012 | 8,20 | 678 | 0,22 | 1,74 | 136 | 380 | 54,7 | 7,71 | 24,9 | 73,0 |
| | 04.2013 | 8,20 | 543 | 0,20 | 20,4 | 154 | 233 | 52,0 | 7,73 | 23,8 | 51,5 |
| Среднее | | 7,90 | 419 | 0,16 | 8,90 | 76,7 | 233 | 34,4 | 4,29 | 18,8 | 43,3 |
| Подземные воды кимберлитовых водоносных горизонтов | | | | | | | | | | | |
| 7 (Ae) / 80 | 04.2013 | 8,70 | 320 | 0,15 | 19,2 | 11,0 | 206 | 59,7 | 4,68 | 9,58 | 9,89 |
| 8 (Ac) / 90 | 04.2013 | 9,10 | 596 | 0,29 | 117 | 38,4 | 255 | 174 | 3,39 | 4,26 | 4,02 |
| Среднее | | 8,90 | 458 | 0,22 | 68,1 | 24,7 | 231 | 117 | 4,04 | 6,92 | 6,96 |
| Подземные воды вендских водоносных горизонтов | | | | | | | | | | | |
| 9 (Is) / 40 | 09.2012 | – | 253 | 0,17 | 12,6 | 3,36 | 181 | 6,69 | 3,82 | 16,3 | 28,7 |
| | 04.2013 | 7,60 | 490 | 0,17 | 106 | 42,2 | 200 | 98,8 | 3,96 | 15,6 | 24,3 |
| 10 (Le) / 60 | 04.2013 | 7,60 | 183 | 0,10 | 3,95 | 3,35 | 137 | 6,85 | 3,20 | 12,9 | 15,5 |
| 11 (Le1) / 60 | 09.2012 | 8,20 | 209 | 0,18 | 0,09 | 2,19 | 159 | 6,96 | 6,24 | 13,2 | 21,7 |
| 12 (KoR) / 60 | 09.2012 | 8,00 | 227 | 0,10 | 4,73 | 3,67 | 171 | 2,03 | 2,41 | 16,1 | 27,2 |
| 13 (KoL) / 60 | 09.2012 | 8,10 | 219 | 0,11 | 2,89 | 3,75 | 163 | 11,0 | 2,76 | 14,4 | 21,5 |
| 14 (Ko2) / 60 | 09.2013 | 8,30 | 233 | 0,09 | 19,3 | 9,04 | 146 | 24,0 | 2,36 | 14,7 | 17,4 |
| 15 (Ch) / 120 | 09.2012 | 8,20 | 251 | 0,11 | 12,5 | 6,43 | 177 | 15,7 | 2,74 | 16,4 | 19,9 |
| | 04.2013 | 7,80 | 235 | 0,05 | 1,10 | 0,60 | 181 | 18,5 | 2,86 | 15,0 | 15,9 |
| 16 (36d) / 140 | 09.2012 | 8,56 | 329 | 0,20 | 15,0 | 11,9 | 217 | 55,3 | 3,11 | 11,6 | 15,3 |
| | 04.2013 | 8,50 | 326 | 0,18 | 27,5 | 15,9 | 200 | 57,1 | 3,20 | 10,8 | 12,1 |
| | 09.2013 | 8,55 | 332 | 0,21 | 22,7 | 15,1 | 212 | 56,4 | 3,20 | 10,8 | 12,2 |
| | 04.2014 | 8,40 | 348 | 0,25 | 23,6 | 18,2 | 220 | 49,7 | 3,21 | 10,7 | 22,7 |
| | 05.2014 | 8,15 | 336 | 0,24 | 19,1 | 14,7 | 215 | 47,1 | 3,35 | 11,9 | 24,6 |
| | 09.2014 | 8,20 | 321 | 0,28 | 22,3 | 16,2 | 194 | 51,7 | 3,22 | 10,8 | 22,7 |

| Номер точки или скважины / глубина, м | Дата отбора | рН | Минерализация <i>M</i> , мг/л | Концентрации в растворе, мг/л | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|------|-------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|------------------|------|------|------|------|
| | | | | F | Cl | SO ₄ | HCO ₃ | Na | K | Mg | Ca |
| 17 (28d) / 120 | 09.2012 | 8,54 | 262 | 0,09 | 2,93 | 5,93 | 194 | 25,1 | 5,07 | 13,7 | 15,7 |
| | 04.2013 | 8,70 | 234 | 0,14 | 5,21 | 7,50 | 168 | 21,4 | 4,98 | 13,7 | 13,7 |
| | 09.2013 | 8,60 | 239 | 0,12 | 5,44 | 8,39 | 172 | 20,8 | 5,01 | 13,7 | 13,8 |
| | 05.2014 | 8,60 | 268 | 0,17 | 3,25 | 8,78 | 197 | 18,9 | 1,54 | 13,5 | 25,2 |
| | 09.2014 | 8,24 | 270 | 0,15 | 2,84 | 7,75 | 195 | 22,6 | 1,81 | 14,6 | 25,0 |
| 18 (26d) / 140 | 09.2012 | 8,13 | 347 | 0,15 | 23,6 | 13,2 | 220 | 59,1 | 3,47 | 12,1 | 16,4 |
| | 04.2013 | 8,50 | 313 | 0,14 | 28,5 | 15,5 | 185 | 55,1 | 3,53 | 12,0 | 13,5 |
| | 09.2013 | 8,60 | 325 | 0,21 | 34,4 | 14,5 | 192 | 55,0 | 3,52 | 11,8 | 13,5 |
| | 04.2014 | 8,30 | 365 | 0,21 | 38,7 | 18,9 | 214 | 54,8 | 3,60 | 11,5 | 24,3 |
| | 05.2014 | 8,03 | 336 | 0,25 | 34,8 | 17,1 | 192 | 49,4 | 3,74 | 12,7 | 26,2 |
| 09.2014 | 8,06 | 300 | 0,20 | 26,9 | 14,7 | 174 | 39,4 | 3,68 | 13,7 | 27,7 | |
| 19 (24d) / 140 | 09.2012 | 8,64 | 307 | 0,23 | 12,1 | 12,3 | 203 | 60,6 | 3,02 | 6,59 | 9,62 |
| 20 (22d) / 140 | 09.2012 | 8,63 | 451 | 0,20 | 79,8 | 31,0 | 203 | 113 | 3,96 | 9,46 | 10,8 |
| | 04.2013 | 8,45 | 480 | 0,17 | 72,7 | 30,5 | 226 | 118 | 5,96 | 13,1 | 13,8 |
| | 09.2013 | – | 410 | 0,24 | 72,5 | 27,8 | 194 | 93,8 | 3,94 | 8,68 | 9,29 |
| | 05.2014 | 8,50 | 395 | 0,34 | 41,6 | 29,7 | 214 | 83,8 | 3,89 | 8,16 | 14,7 |
| | 09.2014 | 8,40 | 353 | 0,31 | 33,3 | 20,2 | 203 | 70,8 | 3,77 | 7,62 | 14,2 |
| 21 (21d) / 180 | 09.2012 | 8,65 | 583 | 0,19 | 138 | 46,3 | 210 | 153 | 4,96 | 14,3 | 16,7 |
| | 04.2013 | 8,35 | 669 | 0,24 | 172 | 56,6 | 229 | 177 | 5,28 | 15,2 | 14,8 |
| | 09.2013 | 8,60 | 719 | 0,16 | 174 | 64,7 | 239 | 199 | 6,52 | 18,8 | 17,7 |
| | 04.2014 | 8,70 | 647 | 0,24 | 178 | 56,2 | 206 | 157 | 5,39 | 16,0 | 28,8 |
| | 05.2014 | 8,17 | 681 | 0,23 | 195 | 59,9 | 206 | 170 | 5,47 | 16,0 | 28,5 |
| | 09.2014 | 8,32 | 641 | 0,26 | 179 | 57,8 | 206 | 155 | 5,23 | 14,8 | 24,0 |
| 22 (10d) / 140 | 09.2012 | 9,16 | 387 | 0,19 | 26,8 | 22,4 | 224 | 101 | 4,22 | 3,78 | 3,91 |
| | 04.2013 | 9,15 | 389 | 0,27 | 51,7 | 26,0 | 201 | 97,8 | 4,48 | 3,93 | 3,66 |
| | 09.2013 | 9,10 | 401 | 0,18 | 48,3 | 23,3 | 218 | 98,3 | 4,66 | 4,10 | 3,85 |
| | 04.2014 | 9,10 | 387 | 0,23 | 38,9 | 25,6 | 217 | 85,5 | 5,00 | 6,10 | 9,34 |
| | 05.2014 | 9,08 | 373 | 0,26 | 29,5 | 23,5 | 220 | 80,0 | 4,99 | 6,20 | 9,52 |
| | 09.2014 | 9,03 | 366 | 0,26 | 26,6 | 23,2 | 218 | 77,0 | 4,88 | 6,33 | 9,66 |
| 23 (6d) / 180 | 09.2012 | 8,91 | 715 | 0,25 | 160 | 82,9 | 238 | 216 | 4,74 | 6,47 | 6,39 |
| | 04.2013 | 9,00 | 762 | 0,41 | 194 | 78,9 | 242 | 229 | 4,95 | 6,20 | 5,61 |
| | 09.2013 | 8,90 | 760 | 0,18 | 179 | 77,7 | 253 | 221 | 9,45 | 10,6 | 9,73 |
| | 04.2014 | 9,10 | 732 | 0,40 | 178 | 76,1 | 249 | 210 | 5,03 | 5,24 | 8,49 |
| | 05.2014 | 9,06 | 748 | 0,26 | 190 | 80,9 | 244 | 214 | 5,10 | 5,42 | 9,06 |
| | 09.2014 | 9,02 | 704 | 0,31 | 155 | 75,6 | 247 | 207 | 5,14 | 5,81 | 8,93 |
| 24 (4d) / 150 | 09.2012 | 9,03 | 613 | 0,25 | 118 | 56,4 | 242 | 184 | 5,18 | 3,59 | 3,47 |
| | 04.2013 | 9,20 | 625 | 0,38 | 129 | 49,7 | 250 | 183 | 5,60 | 3,99 | 3,43 |
| | 09.2013 | 9,10 | 686 | 0,20 | 150 | 61,1 | 249 | 209 | 7,12 | 5,29 | 4,62 |
| | 04.2014 | 9,00 | 638 | 0,31 | 141 | 50,8 | 244 | 183 | 6,13 | 5,25 | 7,98 |
| | 09.2014 | 8,89 | 646 | 0,33 | 138 | 53,0 | 247 | 187 | 6,15 | 5,24 | 8,91 |
| 25 (9mz) / 200 | 05.2014 | 7,60 | 725 | 0,26 | 189 | 77,4 | 210 | 212 | 5,03 | 10,1 | 20,7 |
| 26 (16h) / 180 | 09.2012 | – | 392 | 0,35 | 42,9 | 17,1 | 218 | 75,3 | 9,14 | 15,3 | 14,1 |
| | 04.2013 | 8,55 | 939 | 0,13 | 272 | 140 | 214 | 282 | 8,58 | 12,9 | 9,82 |
| 27 (Lo) / 180 | 09.2012 | – | 792 | 1,21 | 168 | 41,2 | 320 | 248 | 6,37 | 4,51 | 3,33 |
| | 05.2013 | 9,15 | 811 | 1,11 | 165 | 57,3 | 314 | 262 | 6,10 | 4,15 | 2,71 |
| | 05.2014 | 9,00 | 828 | 1,35 | 201 | 48,4 | 313 | 251 | 5,98 | 3,60 | 5,26 |
| | 09.2014 | 9,15 | 742 | 0,97 | 149 | 35,2 | 313 | 225 | 6,80 | 5,13 | 7,36 |
| Среднее без скв. 27 | | 8,54 | 446 | 0,22 | 74,2 | 33,0 | 208 | 101 | 4,53 | 10,8 | 15,2 |
| Среднее для скв. 27 | | 9,13 | 793 | 1,16 | 171 | 45,5 | 315 | 247 | 6,31 | 4,35 | 4,67 |

Примечание. * В скобках указаны номера точек (скважин) отбора проб согласно [Малов, 2018].

Таблица 2

Корреляционные связи содержания фтора с величиной рН, минерализацией и концентрациями компонентов основного солевого состава в речных и пресных подземных водах Юго-Восточного Беломорья*

| Компонент | рН | М | F | Cl | SO ₄ | HCO ₃ | Na | K | Mg | Ca |
|---|-------|-------|-------|-------|-----------------|------------------|-------|------|------|----|
| Все пробы речных и пресных подземных вод*, n = 82 | | | | | | | | | | |
| рН | 1 | | | | | | | | | |
| М | 0,57 | 1 | | | | | | | | |
| F | 0,65 | 0,60 | 1 | | | | | | | |
| Cl | 0,40 | 0,90 | 0,44 | 1 | | | | | | |
| SO ₄ | 0,36 | 0,86 | 0,41 | 0,72 | 1 | | | | | |
| HCO ₃ | 0,66 | 0,74 | 0,65 | 0,40 | 0,60 | 1 | | | | |
| Na | 0,61 | 0,94 | 0,58 | 0,95 | 0,75 | 0,55 | 1 | | | |
| K | 0,64 | 0,75 | 0,51 | 0,57 | 0,70 | 0,70 | 0,66 | 1 | | |
| Mg | -0,30 | 0,14 | -0,19 | -0,01 | 0,21 | 0,32 | -0,16 | 0,19 | 1 | |
| Ca | -0,38 | 0,07 | -0,09 | -0,14 | 0,25 | 0,32 | -0,26 | 0,06 | 0,87 | 1 |
| Речные воды, n = 14 | | | | | | | | | | |
| рН | 1 | | | | | | | | | |
| М | 0,25 | 1 | | | | | | | | |
| F | 0,01 | 0,92 | 1 | | | | | | | |
| Cl | 0,12 | 0,95 | 0,91 | 1 | | | | | | |
| SO ₄ | 0,19 | 0,97 | 0,91 | 0,99 | 1 | | | | | |
| HCO ₃ | 0,35 | 0,95 | 0,83 | 0,82 | 0,85 | 1 | | | | |
| Na | 0,18 | 0,96 | 0,91 | 0,99 | 0,98 | 0,84 | 1 | | | |
| K | 0,33 | 0,99 | 0,86 | 0,94 | 0,95 | 0,95 | 0,96 | 1 | | |
| Mg | 0,33 | 0,81 | 0,66 | 0,65 | 0,68 | 0,91 | 0,63 | 0,81 | 1 | |
| Ca | 0,13 | 0,94 | 0,92 | 0,85 | 0,86 | 0,94 | 0,84 | 0,90 | 0,88 | 1 |
| Подземные воды четвертичных водоносных горизонтов, n = 4 | | | | | | | | | | |
| рН | 1 | | | | | | | | | |
| М | 0,44 | 1 | | | | | | | | |
| F | -0,54 | -0,81 | 1 | | | | | | | |
| Cl | 0,25 | 0,89 | -0,92 | 1 | | | | | | |
| SO ₄ | 0,39 | 0,98 | -0,89 | 0,96 | 1 | | | | | |
| HCO ₃ | 0,47 | 0,41 | 0,08 | -0,05 | 0,21 | 1 | | | | |
| Na | 0,21 | 0,86 | -0,92 | 1,00 | 0,95 | -0,11 | 1 | | | |
| K | 0,04 | 0,84 | -0,83 | 0,98 | 0,92 | -0,11 | 0,98 | 1 | | |
| Mg | 0,56 | 0,82 | -0,41 | 0,47 | 0,68 | 0,86 | 0,42 | 0,40 | 1 | |
| Ca | 0,48 | 0,59 | -0,10 | 0,16 | 0,41 | 0,98 | 0,10 | 0,10 | 0,94 | 1 |
| Подземные воды каменноугольных водоносных горизонтов, n = 4 | | | | | | | | | | |
| рН | 1 | | | | | | | | | |
| М | 0,97 | 1 | | | | | | | | |
| F | 0,98 | 0,98 | 1 | | | | | | | |
| Cl | 0,33 | 0,10 | 0,19 | 1 | | | | | | |
| SO ₄ | 0,98 | 0,93 | 0,97 | 0,40 | 1 | | | | | |
| HCO ₃ | 0,83 | 0,93 | 0,87 | -0,24 | 0,74 | 1 | | | | |
| Na | 1,00 | 0,98 | 0,97 | 0,29 | 0,96 | 0,86 | 1 | | | |
| K | 0,99 | 0,97 | 0,99 | 0,32 | 0,99 | 0,81 | 0,98 | 1 | | |
| Mg | 1,00 | 0,98 | 0,98 | 0,27 | 0,97 | 0,86 | 1,00 | 0,99 | 1 | |
| Ca | 0,93 | 0,99 | 0,97 | -0,04 | 0,89 | 0,96 | 0,94 | 0,93 | 0,95 | 1 |
| Подземные воды вендских водоносных горизонтов*, n = 58 | | | | | | | | | | |
| рН | 1 | | | | | | | | | |
| М | 0,45 | 1 | | | | | | | | |
| F | 0,51 | 0,49 | 1 | | | | | | | |
| Cl | 0,34 | 0,98 | 0,42 | 1 | | | | | | |
| SO ₄ | 0,40 | 0,97 | 0,41 | 0,96 | 1 | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|------------------|-------|-------|------|----|
| Компонент | pH | M | F | Cl | SO ₄ | HCO ₃ | Na | K | Mg | Ca |
| HCO ₃ | 0,67 | 0,76 | 0,64 | 0,64 | 0,67 | 1 | | | | |
| Na | 0,52 | 0,99 | 0,51 | 0,96 | 0,96 | 0,79 | 1 | | | |
| K | 0,46 | 0,66 | 0,30 | 0,63 | 0,63 | 0,52 | 0,67 | 1 | | |
| Mg | -0,76 | -0,30 | -0,59 | -0,17 | -0,28 | -0,57 | -0,40 | -0,15 | 1 | |
| Ca | -0,77 | -0,35 | -0,32 | -0,24 | -0,34 | -0,52 | -0,46 | -0,37 | 0,79 | 1 |

Примечание. * За исключением скв. 27.

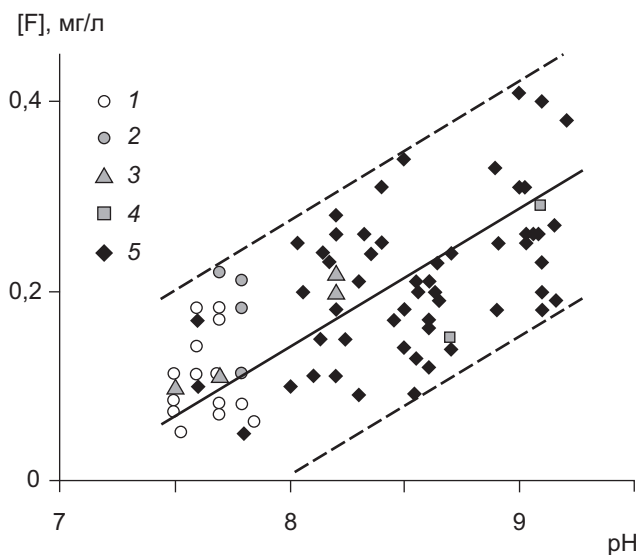


Рис. 2. Зависимость содержания фтора в речных (1) и пресных подземных водах четвертичных (2), каменноугольных (3), кимберлитовых (4) и вендских (5) водоносных горизонтов Юго-Восточного Беломорья от величины pH (за исключением скв. 27). Сплошной линией обозначена линия тренда, $r = 0,65$; пунктиром ограничен доверительный интервал $\pm 1,5\sigma$ от линии тренда

да следует, что Архангельская область относится к биогеохимическим провинциям со значительным дефицитом фтора и определяющую роль в его распространенности в поверхностных и пресных подземных водах региона играет не литогенная основа, а климатический фактор.

Заключение. Согласно результатам проведенных исследований, поверхностные и пресные подземные воды Архангельской области в эколого-гигиеническом отношении являются дефицитными по фтору, содержание которого в несколько раз меньше нижнего предела диапазона его оптимальных значений. Это обстоятельство необходимо учитывать при преобразовании старых и разработке новых технологических схем питьевого водоснабжения рассматриваемой территории.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00088, <https://rscf.ru/project/24-17-00088/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека (этиология, классификация, органопатология). М.: Медицина, 1991. 496 с.
 Агалакова Н.И., Гусев Г.П. Влияние неорганических соединений фтора на живые организмы различного фило-

Таблица 3
 Сравнение содержания фтора в водах питьевого назначения Юго-Восточного Беломорья и смежных территорий Архангельской области

| Объект | Содержание фтора, мг/л | |
|---|------------------------|-----------|
| | среднее | диапазон |
| Территория Юго-Восточного Беломорья | | |
| Речные воды: | | |
| р. Северная Двина, устьевой участок | 0,13 | 0,08–0,18 |
| р. Золотица | 0,09 | 0,05–0,18 |
| р. Белая | 0,07 | – |
| Пресные подземные воды: | | |
| четвертичных водоносных горизонтов | 0,18 | 0,11–0,22 |
| каменноугольных водоносных горизонтов | 0,16 | 0,10–0,22 |
| кимберлитовых водоносных горизонтов | 0,22 | 0,15–0,29 |
| вендских водоносных горизонтов без скв. 27 | 0,22 | 0,05–0,41 |
| скв. 27 | 1,16 | 0,97–1,35 |
| Юго-Восточное побережье Белого моря [Савенко, 2003; Savenko, Savenko, 2024] | | |
| Р. Онега, устьевой участок | 0,16 | 0,12–0,19 |
| Р. Северная Двина, устьевой участок | 0,14 | 0,09–0,22 |
| Р. Кулой, устьевой участок | 0,22 | 0,20–0,24 |
| Р. Мезень, устьевой участок | 0,13 | – |
| Устьянский район Архангельской области [Avessalomova et al., 2016] | | |
| Р. Кокшеньга, среднее течение | 0,13 | – |
| Бассейн р. Заячьей: | | |
| верхнее течение | 0,04 | 0,01–0,06 |
| среднее и нижнее течение | 0,18 | 0,10–0,21 |
| грунтовые воды | 0,15 | 0,11–0,22 |

генетического уровня // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2011. Т. 47, № 5. С. 337–347.
 Габович Р.Д., Минх А.А. Гигиенические проблемы фторирования питьевой воды. М.: Медицина, 1979. 200 с.

Горностаева Е.А., Фукс С.Л. Влияние фторсодержащих соединений на живые организмы (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 14–24.

Жукова А.Г., Михайлова Н.Н., Казыцкая А.С., Алехина Д.А. Современные представления о молекулярных механизмах физиологического и токсического действия соединений фтора на организм // Медицина в Кузбассе. 2017. Т. 16, № 3. С. 4–11.

Иорданишвили А.К. Фториды: их значение для здоровья человека в современных условиях и перспективы использования // Курский научно-практический вестник «Человек и его здоровье». 2019. № 2. С. 66–73.

Комарова Н.В., Каменцев Я.С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ». СПб.: Веда, 2006. 212 с.

Малов А.И. Подземные воды Юго-Восточного Беломорья: формирование, роль в геологических процессах. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 234 с.

Савенко А.В. Геохимия стронция, фтора и бора в зоне смешения речных и морских вод. М.: ГЕОС, 2003. 170 с.

Савенко В.С. Введение в ионометрию природных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 77 с.

Сазонов Н.Н. Микроэлементы в мерзлотных экосистемах и их значение в использовании биологических ресурсов Якутии: Дисс. ... докт. биол. наук. М., 2000. 383 с.

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021.

Янин Е.П. Фтор в окружающей среде (распространенность, поведение, техногенное загрязнение) // Экологическая экспертиза. 2007. № 4. С. 2–98.

Ali S., Thakur S.K., Sarkar A., Shekhar S. Worldwide contamination of water by fluoride // Environ. Chem. Lett. 2016. Vol. 14, N 3. P. 291–315.

Avessalomova I.A., Khoroshev A.V., Savenko A.V. Barrier function of floodplain landscapes in runoff formation // Riparian Zones: Characteristics, Management Practices and Ecological Impacts. Ch. 8. N.Y.: Nova Science Publ., 2016. P. 181–210.

Edmunds W.M., Smedley P.L. Fluoride in natural waters // Essentials of Medical Geology. Dordrecht et al.: Springer, 2013. P. 311–336.

Fuge R. Fluorine in the environment, a review of its sources and geochemistry // Appl. Geochem. 2019. Vol. 100. P. 393–406.

Malov A.I. Assessment of water supply to the East European Arctic agglomeration from groundwater, taking into account their quality and health risks // Environ. Pollut. 2024. Vol. 360. P. 124636.

Malov A.I. Evolution of groundwater chemistry in coastal aquifers of the south-eastern White Sea area (NW Russia) using ^{14}C and ^{234}U – ^{238}U dating // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 616–617. P. 1208–1223.

Savenko A.V., Savenko V.S. Trace element composition of the dissolved matter runoff of the Russian Arctic rivers // Water. 2024. Vol. 16, N 4. P. 565.

Weinstein L.H., Davison A.W. Fluorides in the Environment: Effects on Plants and Animals. Wallingford, Cambridge: CABI Publ., 2004. 296 p.

Статья поступила в редакцию 08.02.2025,
одобрена после рецензирования 12.03.2025,
принята к публикации 23.05.2025