

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.3+551.444+556+550.8.05

doi: 10.26907/2542-064X.2024.1.169-182

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ФАКТОР ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ЗОН СУБАКВАЛЬНОЙ РАЗГРУЗКИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

А.В. Татаркин, П.А. Красильников

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, 614068, Россия*

Аннотация

В статье рассмотрены теоретические предпосылки совершенствования технологии акваториальных исследований, включающей в себя комплекс методов термометрии и резистивиметрии. Проведена оценка переходных процессов, влияющих на изменение температуры в системе «вода–воздух», что указывает на необходимость учета тепловых характеристик всех элементов. На основе теории теплообмена и предложенной идеи о выделении источника из общего температурного поля получено выражение для его расчета. Локализация зон субаквальной разгрузки приповерхностных вод определяется разницей температур в водотоке и источнике. Многофакторный анализ, основанный на использовании абсолютной величины и знака разностного параметра, в совокупности с минерализацией воды указывает на тип ее распространения по глубине. По результатам теоретических исследований выполнены успешная апробация и верификация полученных критериев на одном из водотоков промышленной агломерации Пермского края, что подтверждает перспективность применения этих подходов при решении гидрогеологических задач.

Ключевые слова: гидрогеологические условия, водоток, подземные воды, субаквальная разгрузка, поиск, термометрия, резистивиметрия.

Введение

Мониторинг природно-технических систем имеет большое значение при разработке природоохранных мероприятий и изучении инженерно-геологических условий районов промышленных агломераций [1, 2]. Эффективность принятия решений по защите от негативных воздействий во многом зависит от используемых подходов и экологической обстановки исследуемых объектов [3]. При этом одним из важных элементов мониторинга является качественная и количественная оценка минерализации поверхностных и подземных вод в совокупности с обнаружением зон их разгрузки.

При выполнении гидрогеологических и гидрологических исследований в большинстве случаев определение минерализации осуществляется точечно – методом опробования из различных известных источников воды с целью ее дальнейшего изучения в лабораторных условиях. Следует отметить, что указанный подход не всегда обеспечивает получение информации о пространственных закономерностях изучаемых ореолов засоления в полной мере.

В подобных ситуациях полезным является привлечение геофизических методов, которые позволяют оперативно получить более детальную информацию об исследуемом объекте практически в непрерывном режиме. Предпосылкой использования геофизических методов, основанных на изучении электрических полей, является обратно пропорциональная связь между минерализацией воды и ее удельным электрическим сопротивлением.

Однако, как следует из физических основ, на достоверность определения удельного электрического сопротивления веществ существенным образом влияет также их температура. Кроме того, тепловые вариации воды имеют большое значение при выявлении областей разгрузки приповерхностных и подземных вод [4]. В связи с этим вышеперечисленные аспекты, связанные с температурным фактором при проведении геофизических исследований в рамках мониторинга приповерхностной гидросферы, являются актуальными для получения достоверной информации, не зависящей от внешних воздействий [5, 6].

Целью проводимых исследований являются оценка влияния внешних температурных вариаций на результаты акваториальных наблюдений и поиск интерпретационных критериев для выявления и локализации зон разгрузки подземных вод на примере одной из промышленных агломераций.

1. Теоретические основы и методология исследований

При исследовании акваторий важную роль играет местоположение выполнения измерений во внутренних точках изучаемой среды, которые могут располагаться в интервале глубин от поверхности водотока до донных отложений. Наиболее эффективным, но менее производительным является применение методики термозондирования. Данный способ позволяет получить практически непрерывную информацию по глубине [7].

Однако в ситуациях, когда морфология дна претерпевает большие изменения и величина толщи воды существенно меняется, измерения ограничиваются одним или двумя значениями температуры в поперечном профиле водотока, включая донные отложения. В таких случаях заметное влияние на результаты измерений оказывают суточные вариации температуры в совокупности со скоростными характеристиками потока поверхностных вод.

В плане мониторинговых наблюдений перспективным является использование технологии волоконно-оптического измерения температуры, когда в качестве термодатчиков используется само волокно [3, 8, 9]. Физическими предпосылками являются рэлеевское и рамановское рассеяние света, проявляющиеся в локальных изменениях свойств световодов при вариациях температуры или давления.

Возможность выделения источников разгрузки подземных вод в поверхностных водотоках связана с их температурной дифференциацией. Так, например, в летний период данная разница температур может находиться в диапазоне от 4 до 20 °С. При этом наибольший перепад значений характерен в теплую фазу и для участков русел, имеющих медленное течение с невыраженной морфологией рельефа местности.

При рассмотрении процессов, влияющих на температуру воды, можно представить систему, в которой взаимодействуют два вещества в различных

фазах: воздух и вода. Между данными фазами возникают переходные процессы в виде испарения и конденсации, которыми на данный момент можно пренебречь ввиду их наименьшего влияния во времени. Кроме того, большие величины теплового потока солнечного тепла и разница в теплопроводности двух фаз способствуют меньшему времени нагрева воды при значительном периоде ее охлаждения.

В качестве примера ниже представлен график изменения температуры тела t_1 в газообразной окружающей среде с температурой $t_2 = 20^\circ\text{C}$ (рис. 1) по расчетам, в основе которых лежит закон Ньютона – Рихмана [10] для случая эквивалентных масс. Как видно из графика, двукратное увеличение температуры происходит в течение первых 20 мин, а трехкратное – в течение часа. Такие изменения могут оказывать существенное воздействие на измерения, проводимые в течение суточных колебаний.

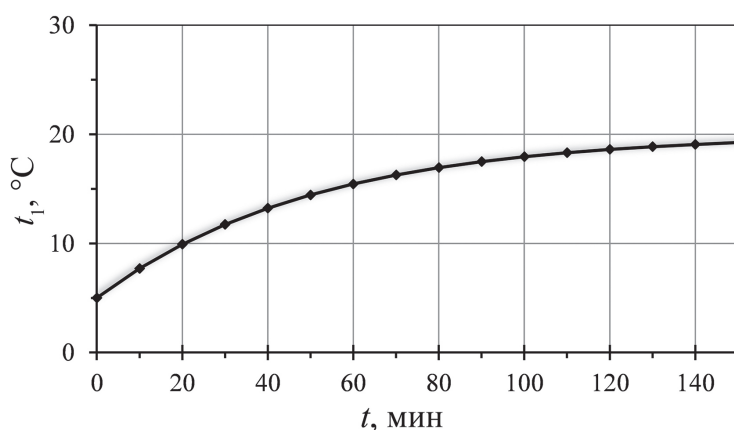


Рис. 1. График изменения температуры тела $t_1 = 5^\circ\text{C}$, помещенного в окружающую среду с температурой $t_2 = 20^\circ\text{C}$

Из вышесказанного следует, что температура воды в водотоке (t_j) является результатом суперпозиции температурных полей воздуха (t_c) и подземных источников (t_i) [11, 12] (уравнение 1):

$$t_j = t_c + \sum_{j=1}^n (F_{ij} t_{ij}), \quad (1)$$

где F_{ji} – коэффициенты теплоотдачи.

Таким образом, итоговый результат будет всегда представлен в виде суммы температурных полей от различных источников и стоков тепла.

Эффект теплового воздействия (перегрева) Q в системе может быть представлен как сумма тепловых источников t_i и коэффициентов их теплоотдачи F (уравнение 2):

$$Q = \sum_{j=1}^n (F_{ij} t_{ij}) = t_j - t_c. \quad (2)$$

То есть в простейшем виде температура источника равняется разнице температур водотока и воздуха.

В соответствии с законом Рихмана для определения температуры смеси T_m двух веществ различной температуры (t_1, t_2), массы (m_1, m_2) и теплоемкости (C_1, C_2) используется уравнение 3:

$$t_m = \frac{m_1 C_1 t_1 + m_2 C_2 t_2}{m_1 C_1 + m_2 C_2} \quad (3)$$

Используя уравнение 3, можно рассмотреть два случая. В первом принимаются во внимание масса и теплоемкость взаимодействующих веществ, а во втором – только теплоемкость. С учетом величин теплоемкости воздуха и воды при условии эквивалентности взаимодействующих масс формула для расчета температуры смеси (уравнение 4) имеет следующий вид:

$$t_j = \frac{4200t_i + 1000t_c}{4200 + 1000}, \quad (4)$$

откуда выражение для температуры источника описывается уравнением 5:

$$t_i = 1.24t_j - 0.24t_c. \quad (5)$$

Дифференциация температуры в водотоке зависит от многих факторов. Наибольшее влияние на однородность теплового поля воды оказывают такие факторы, как скорость течения и морфология дна, которые участвуют в процессе перемешивания масс. При этом величина теплового стока может существенно варьироваться в зависимости от климатических условий. Кроме того, по результатам анализа общедоступных данных о температуре в водоемах относительно температуры окружающей среды, отмечается тепловая инерция, отображающаяся во временном отставании на величину порядка двух часов. Этот аспект указывает на появление трудностей при рассмотрении совокупности измерений, полученных в различные временные интервалы.

Таким образом, в качестве интерпретационного критерия целесообразно применить разностный параметр, который свидетельствует о наличии подземных источников в русловой части водотоков. Так, например, в летний период о разгрузке подземных вод свидетельствуют положительные значения этого параметра. В зимнее же время или переходный период, когда температура источников, как правило, превышает температуру в водотоках, происходит инверсия разностного параметра и выявление зон разгрузки вод из подземных горизонтов осуществляется по отрицательным значениям.

Величина разницы температур между водотоком и источником для выделения зон разгрузки в конечном виде будет выглядеть следующим образом (уравнение 6):

$$\Delta t = t_j - t_i = 0.24(t_c - t_j) = \frac{C_{\text{воздуха}}}{C_{\text{воды}}}(t_c - t_j). \quad (6)$$

Следует отметить, что при применении многофакторного анализа для локализации и геометризации зон активного водообмена целесообразно введение обобщенного комплексного параметра, основанного на использовании тепловых характеристик в совокупности с определением минерализации в поверхностных водотоках.

Оценка минерализации поверхностных и подземных вод осуществляется по удельному электрическому сопротивлению, которое также зависит от температуры и концентрации солей. Как известно, увеличение массовой доли солей и температуры водных растворов повышает их электрическую проводимость. Взаимосвязь данных параметров по лабораторным исследованиям, в частности

для раствора хлорида натрия, представлена на рис. 2. Для описания данной зависимости может быть использовано уравнение $y = 5.682x - 0.984$ при аппроксимации с величиной достоверности R^2 , равной 0.9996.

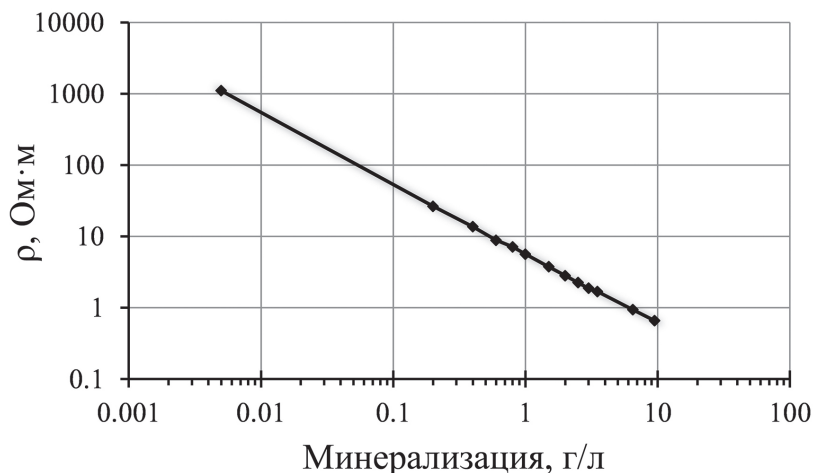


Рис. 2. Зависимость удельного электрического сопротивления (ρ) от минерализации раствора хлорида натрия при температуре воды, равной 20 °C

При оценке минерализации вод по электрическому сопротивлению температурный фактор также является важной составляющей, которая существенным образом влияет на ее абсолютные значения. Для учета данного показателя натурные наблюдения удельного электрического сопротивления, как правило, сопровождаются измерениями температуры воды, которые в дальнейшем могут быть учтены для корректной интерпретации получаемых результатов. Определение количественных характеристик выполняется по известным формулам [13, 14] для приведения их к одному уровню температуры, как правило, к 20 °C.

Следует отметить, что температура грунтовых вод может изменяться по ряду причин эндогенного или экзогенного характера. В зависимости от инженерно-геологических условий исследуемых территорий наибольшее воздействие на это оказывают такие компоненты геологической среды, как глубина залегания, состав грунта, климатические условия региона и т. д. Обычно температура грунтовых вод ниже температуры окружающей среды на 20–50%. В качестве примера на рис. 3 и 4 приведены сезонные изменения температуры грунтового массива и вариации среднемесячных температур в августе, полученные в рамках мониторинговых наблюдений одной из площадок г. Перми [15].

Исходя из анализа графиков, представленных на рис. 3 и 4, можно сделать вывод о стабилизации теплового поля с глубины порядка 9 м, где ожидаемая температура подземных вод для центральной части данного региона будет составлять около 11 °C. До глубины 9 м сезонные вариации температуры подземных вод находятся в интервале 4–18 °C с наибольшими изменениями в верхней части разреза до 2 м.

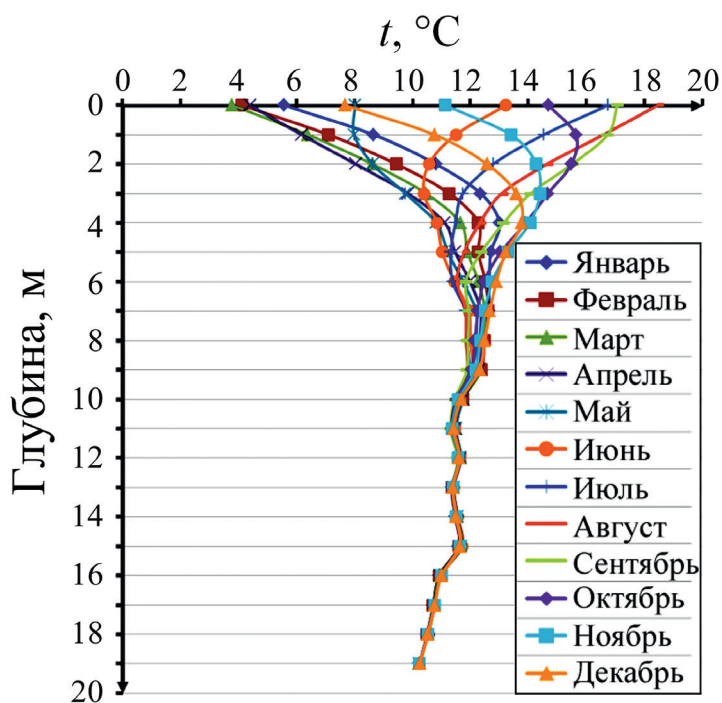


Рис. 3. Изменение среднемесячных температур с глубиной в рамках пятилетних режимных наблюдений [15]

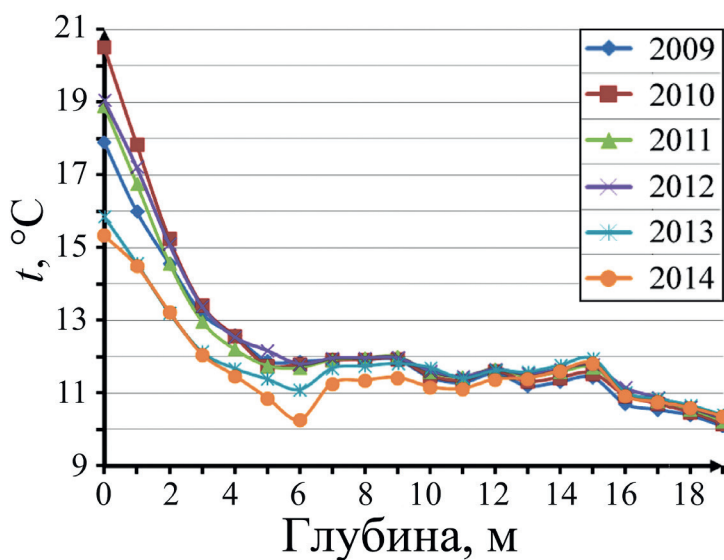


Рис. 4. Графики вариаций по глубине среднемесячных температур в августе в период с 2009 по 2014 гг. [15]

Таким образом, с учетом вышесказанного для достижения поставленной цели исследования необходимо решение следующих задач:

- выбор объекта исследований;
- анализ априорной информации по изучаемому объекту;
- проведение натурных наблюдений;

- сравнительный анализ и выявление закономерностей в рамках сопоставления теоретических и экспериментальных данных;
- верификация исследований;
- оценка влияния температурного фактора системы «вода-воздух» при изучении гидрогеологических условий и повышение достоверности данных.

2. Объект исследований

В качестве объекта для изучения выбран один из участков гидрографической сети в пределах Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей. На исследуемой территории выделяются четыре крупных водоносных комплекса [16–18]. Первый из них залегает в четвертичных отложениях, распространяется в аллювии водотоков и представлен переслаиванием дисперсных пород мощностью порядка 10 м со средним коэффициентом фильтрации 0.1 м в сутки [17, 18].

Ниже располагается второй горизонт – шешминский (P_{Iss}), максимальная мощность которого достигает 100 м. Питание данного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, а разгрузка наблюдается в аллювий рек посредством родников нисходящего типа с дебитом до 4 л/с и гидрокарбонатно-кальциевой минерализацией до 0.4 г/л. Минерализация достигает своих максимальных значений за счет вертикальной миграции с нижнего горизонта соляно-мергельной толщи (СМТ) или антропогенного воздействия от промышленных объектов [19]. Наряду с этим в составе начинают преобладать сульфаты и хлориды. Следует подчеркнуть сильную дифференциацию водопроницаемости пород по вертикали.

Залегающий ниже терригенно-карбонатный комплекс (ТКТ) по вертикали делится на две части и подпитывается вышележащими горизонтами с разгрузкой преимущественно в пестроцветных отложениях аллювия долин рек и низовьев их притоков. В среднем проводимость пород ТКТ составляет 200 м²/сут, в долинах малых рек водопроводимость увеличивается до 300–500 м²/сут. Минерализация в горизонте варьируется от 0.3 до 1 г/л с преобладанием в составе ионов натрия и калия. Далее по глубине концентрация солей хлоридов натрия возрастает до 300 г/л [20].

Значительные разности напоров в СМТ и ТКТ показывают, что СМТ хорошо изолирована от ТКТ. Фильтрационные свойства СМТ достаточно низкие.

Водоупорная, практически абсолютно соляная толща иренского горизонта кунгурского яруса нижней перми (P_{Iir}) ограничивает гидрогеологическую систему снизу, и его кровлей считается «соляное зеркало», расположенное в низах СМТ.

По данным инженерных изысканий в пределах объекта исследований обнаружены три водоносных горизонта. Наиболее близкий к поверхности водоносный горизонт располагается на глубине порядка 2 м. Водовмещающие породы представлены мягкопластичными суглинками. Второй от поверхности водоносный горизонт находится в пойме существующих водотоков. Водовмещающими породами являются суглинки, супеси и глины. Третий от поверхности водоносный горизонт отнесен к переслаивающимся алевролитам и песчаникам.

3. Результаты исследований

В рамках натурных наблюдений на выбранном водотоке протяженностью 2,6 км проведены исследования методами термометрии и резистивиметрии. Точки измерений располагались в интервалах глубин от 4 до 10 см ниже уровня воды с шагом по руслу, соответствующим 10 м. В качестве измерительной схемы для определения удельного электрического сопротивления мы использовали четырехэлектродную установку Веннера с расстоянием 2,5 см между электродами, расположенными в горизонтальной плоскости. Параллельно выполняли изучение температуры в двух точках. Одна из них находилась в воде вместе с установкой для определения удельного электрического сопротивления [21], а другая располагалась на высоте 1,5 м от уреза воды. Наблюдения были выполнены за один суточный цикл в июне 2022 г.

В качестве аппаратурных средств использовали современные комплексы: АМС-1, АРРА-107N, ТМ-6801BS-Line. Перед началом исследований проводили тарировку зондов и датчиков на образцах воды с известной минерализацией и температурой. Погрешность полевых наблюдений составила менее 3%. Полученные данные термометрии и резистивиметрии в контексте рассмотренной выше методологии представлены в виде графиков на рис. 5.

По результатам совместного анализа наблюдаемых графиков изменения температур (рис. 5, а) отмечаются фазовые переходы, отображающиеся в периодическом преобладании того или иного измеренного параметра. Значения температуры источника, полученные по уравнению 5, наиболее приближены к температуре в водотоке, при этом температура воздуха, как правило, превышает данный показатель, за исключением конечной (вечерней) фазы цикла натурных наблюдений (пикеты 192–265). Данный факт указывает на то, что климатические условия с учетом процессов теплообмена могут оказывать значительное влияние на формирование температурного режима подземных вод, а идентификация источников разгрузки подземных вод по одному параметру является весьма затруднительной и неоднозначной.

В то же время оценка разностной характеристики указывает на наличие дифференциации между областями с одинаковым знаком данного параметра. Кроме того, следует отметить присутствие локальных аномалий Δt , отличающихся от фоновых значений в 1,5–2 раза (рис. 5, б). Отмеченные выше аномалии имеют четкую корреляцию с относительной минерализацией по данным резистивиметрии (рис. 5, в).

Исходя из теоретических основ, представленных выше, положительные значения разностного параметра указывают на подземную локализацию источников и, наоборот, отрицательные величины свидетельствуют о приповерхностном или поверхностном характере движения воды. По результатам комплексного анализа с учетом полученных критериев и верификации данных на местности выделены основные (аномальные) источники притоков воды, а также выполнено их типовое разделение (табл. 1).

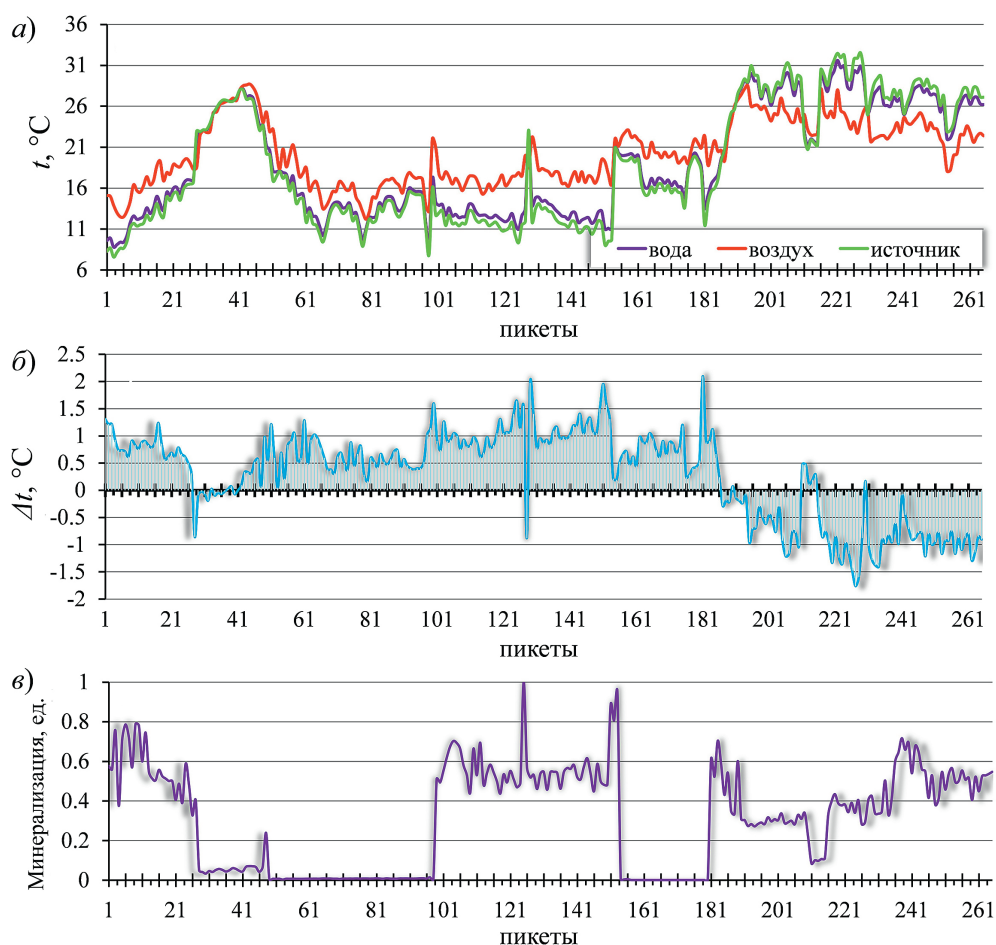


Рис. 5. Графики изменения температуры воды, воздуха, источника (а), разностного параметра температур (б) и относительной минерализации (в)

Табл. 1

Характеристика выделенных источников воды

№	Расположение, пикет	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Относительная минерализация, ед.	Тип залегания	Верификация
1	17	+1.2	0.5	подземный	родник
2	28	-0.8	0.4	поверхностный	приток
3	48	+0.1	0.2	поверхностный	дренаж
4	128	-0.9	1.0	поверхностный	приток
5	129	+2.0	0.5	подземный	родник
6	151	+1.9	0.9	подземный	родник
7	211	+0.5	0.1	подземный	родник

Сопоставление полученных данных с натурным обследованием предполагаемых мест разгрузки указывает на хорошую верификацию прогнозных значений разностного параметра Δt . В частности, все положительные аномалии носят глубинный характер и подтверждены наличием разгрузки подземных вод в виде род-

ников. В то же время в зонах с отрицательными значениями Δt обнаружены участки инфильтрации поверхностных вод природного или техногенного характера.

Следует обратить внимание на то, что показатели разности температур, близкие к нулевой отметке, свидетельствуют о смешанном типе источника и наличии более сложных гидрогеологических условий. Это обусловлено разгрузкой из нескольких водоносных горизонтов, гидравлически связанных с поверхностными стоками.

Заключение

Для поиска мест разгрузки поверхностных и подземных вод в существующие водотоки рассмотрен подход, основанный на учете температуры воздуха при гидрогеологических исследованиях. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что учет влияния температурных характеристик системы «вода-воздух» позволяет идентифицировать и дифференцировать источники поверхностных и подземных вод.

Таким образом, для повышения достоверности результатов гидрогеологических исследований [22] необходимо использование дополнительных характеристик, связанных с экзогенными процессами, а именно разностного параметра температур водотока и окружающей среды. Это позволяет более точно определять места разгрузки подземных и поверхностных вод с целью дальнейшего принятия обоснованных проектных решений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Vaganov S., Blinov S., Belkin P., Perevoshchikov R. The role of subaquatic springs in the formation of flow, temperature and chemical composition of river water in the reserve // J. Ecol. Eng. 2022. V. 23, No 3. P. 39–48. <https://doi.org/10.12911/22998993/145465>.
2. Conner A., Gooseff M.N., Chen X., Arntzen E., Garayburu-Caruso V. Groundwater inflows to the Columbia River along the Hanford Reach and associated nitrate concentrations // Front. Water. 2021. V. 3. Art. 574684. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.574684>.
3. Briggs M.A., Harvey J.W., Hurley S.T., Rosenberry D.O., McCobb T., Werkema D.D., Lane Jr. J.W. Hydrogeochemical controls on brook trout spawning habitats in a coastal stream // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2018. V. 22, No 12. P. 6383–6398. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6383-2018>.
4. Гриневский С.О., Прокофьев В.В. К методике проведения и интерпретации термометрических измерений для выявления зон субаквальной разгрузки подземных вод // Вест. Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 2005. № 3. С. 55–61.
5. Vaccaro J.J., Maloy K.J. A Thermal Profile Method to Identify Potential Ground-Water Discharge Areas and Preferred Salmonid Habitats for Long River Reaches: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5136. Reston, VA: U.S. Dep. Inter., U.S. Geol. Surv., 2006. 16 p. <https://doi.org/10.3133/sir20065136>.
6. Hammett S., Day-Lewis F.D., Trottier B., Barlow P.M., Briggs M.A., Delin G., Harvey J.W., Johnson C.D., Lane Jr. J.W., Rosenberry D.O., Werkema D.D. GW/SW-MST: A ground-water/surface-water method selection tool // Groundwater. 2022. V. 60, No 6. P. 784–791. <https://doi.org/10.1111/gwat.13194>.

7. Козак С.З. Методические рекомендации по применению комплекса геофизических методов при гидрогеологических и геоэкологических исследованиях на акваториях. М.: Министерство природных ресурсов РФ; ГИДЭК, 2002. 55 с.
8. Качура С.М., Постнов В.И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). С. 52–61. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61>.
9. Zhu P., Xie X., Sun X., Soto M.A. Distributed modular temperature-strain sensor based on optical fiber embedded in laminated composites // Composites, Part B. 2019. V. 168. P. 267–273. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.078>.
10. Рихман Г.В. Труды по физике. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 711 с.
11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
12. Дульнев Г.Н., Семяшкин З.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
13. Рыжов А.А., Судоплатов А.Д. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр: науч.-техн. информ. сб. ВИЭМС. 1990. С. 27–41.
14. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия: учеб. для хим. спец. вузов. М.: Высшая школа, 2001. 527 с.
15. Захаров А.В., Пономарев А.Б. Мониторинг температурных полей грунтов г. Перми // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2015. № 4. С. 103–112. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2015.4.08>.
16. Сеннов А.С. О возможном подходе к гидродинамической схематизации надсолевой толщи Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. 2016. № 4. С. 48–51. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.04.09>.
17. Лю Ю., Лехов А.В. Моделирование изменения фильтрационных параметров загипсованных пород при фильтрации рассолов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2012. № 6. С. 551–559.
18. Килин Ю.А., Минькевич И.И., Жуланов Г.С. Особенности химического состава подземных вод на Талицком участке ВКМС // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. 2023. № 26. С. 108–116. <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2023.108>.
19. Красильников П.А., Мещерякова О.Ю., Татаркин А.В. Геоинформационный подход к оценке и прогнозу изменений инженерно-геологических условий на подработанных территориях // Инженерная геология. 2021. Т. XVI, № 4. С. 48–60. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-4-48-60>.
20. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. 2-е изд., перераб. М.: Эпсилон Плюс, 2013. 371 с.
21. Гилева М.И., Татаркин А.В., Филимончиков А.А. К вопросу определения удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов в лабораторных условиях // Вестник Пермского университета. Геология. 2014. Вып. 1 (22). С. 44–48.
22. Клецкина О.В., Красильников П.А., Татаркин А.В. Гидрогеохимическая оценка состояния поверхностных вод и выделение зоны влияния объекта размещения отходов в пределах Кирово-Чепецкого промышленного комплекса // Вестник Пермского университета. Геология. 2022. Т. 21, № 2. С. 180–189. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.2.180>.

Поступила в редакцию 06.07.2023

Принята к публикации 07.10.2023

Татаркин Алексей Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геологии и охраны недр

Пермский государственный национальный исследовательский университет

ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614068, Россия

E-mail: vsto08@mail.ru

Красильников Павел Анатольевич, доктор геолого-минералогических наук, доцент, декан геологического факультета

Пермский государственный национальный исследовательский университет

ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614068, Россия

E-mail: geolnauka@gmail.com

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2024, vol. 166, no. 1, pp. 169–182

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2024.1.169-182

The Temperature Factor in Selecting the Areas of Subaqueous Discharge of Near-Surface Water

A.V. Tatarkin, P.A. Krasilnikov***

Perm State National Research University, Perm, 614068 Russia

*E-mail: *vsto08@mail.ru, **geolnauka@gmail.com*

Received July 6, 2023; Accepted October 7, 2023

Abstract

This article considers the theoretical grounds for advancing the existing aquatic research techniques, including a complex of thermometry and resistivity methods. The transient processes that influence the temperature change in the “water–air” system were explored. The need to take into account the thermal characteristics of all elements involved was highlighted. Using the theory of heat exchange and the idea that the water source can be distinguished from the general temperature field, a formula for measuring the general temperature field was derived. It was found that the areas of subaqueous discharge of near-surface water can be localized by the temperature difference between the watercourses and the water source. The multivariate analysis based on the absolute value and sign of the difference temperature parameter was used to determine the salinity value and the changes of the salinity type with depth. The criteria obtained during the theoretical studies were successfully tested and verified on a watercourse located within the industrial agglomeration of the Perm region, which indicates their high potential for solving practical hydrogeological problems.

Keywords: hydrogeological conditions, watercourse, groundwater, subaqueous discharge, search, thermometry, resistivity

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Figure Captions

Fig. 1. Graph of the temperature changes in the body with $t_1 = 5^\circ\text{C}$ placed in the environment with $t_2 = 20^\circ\text{C}$.

Fig. 2. Relationship between the specific electrical resistance (ρ) and the level of salinity in a sodium chloride solution at the water temperature of 20°C .

Fig. 3. Variations in the average monthly temperatures at different depths based on five years of monitoring observations [15].

Fig. 4. Graphs of the variations in the average monthly temperatures of August from 2009 to 2014 at different depths [15].

Fig. 5. Graphs of the changes in the temperatures of water, air, and water source (a), as well as in the difference temperature parameter (b) and relative salinity (c).

References

1. Vaganov S., Blinov S., Belkin P., Perevoshchikov R. The role of subaquatic springs in the formation of flow, temperature and chemical composition of river water in the reserve. *J. Ecol. Eng.*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 39–48. <https://doi.org/10.12911/22998993/145465>.
2. Conner A., Gooseff M.N., Chen X., Arntzen E., Garayburu-Caruso V. Groundwater inflows to the Columbia River along the Hanford Reach and associated nitrate concentrations. *Front. Water*, 2021, vol. 3, art. 574684. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.574684>.
3. Briggs M.A., Harvey J.M., Hurley S.T., Rosenberry D.O., McCobb T., Werkema D., Lane Jr. J.W. Hydrogeochemical controls on brook trout spawning habitats in a coastal stream. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018, vol. 22, no. 12, pp. 6383–6398. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6383-2018>.
4. Grinevsky S.O., Prokof'ev V.V. The methodology for conducting and interpreting thermometric measurements to identify subaqueous groundwater discharge zones. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 4. Geol.*, 2005, no. 3, pp. 55–61. (In Russian)
5. Vaccaro J.J., Maloy K.J. A Thermal Profile Method to Identify Potential Ground-Water Discharge Areas and Preferred Salmonidhabitats for Long River Reaches: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006–5136. Reston, VA, U.S. Dep. Inter., U.S. Geol. Surv., 2006. 16 p. <https://doi.org/10.3133/sir20065136>.
6. Hammett S., Day-Lewis F.D., Trottier B., Barlow P.M., Briggs M.A., Delin G., Harvey J.W., Johnson C.D., Lane Jr. J.W., Rosenberry D.O., Werkema D.D. GW/SW-MST: A groundwater/surface-water method selection tool. *Groundwater*, 2022, vol. 60, no. 6, pp. 784–791. <https://doi.org/10.1111/gwat.13194>.
7. Kozak S.Z. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu kompleksa geofizicheskikh metodov pri gidrogeologicheskikh i geoekologicheskikh issledovaniyakh na akvatoriyakh* [Guidelines for the Use of a Complex of Geophysical Methods in Hydrogeological and Geoecological Studies in Water Areas]. Moscow, Minist. Priir. Resur. RF, GIDEK, 2002. 55 p. (In Russian)
8. Kachura S.M., Postnov V.I. Potential fiber optic sensors and their applications (a review). *Tr. VIAM*, 2019, no. 5 (77), pp. 52–61. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61>. (In Russian)
9. Zhu P., Xie X., Sun X., Soto M.A. Distributed modular temperature-strain sensor based on optical fiber embedded in laminated composites. *Composites, Part B*, 2019, vol. 168, pp. 267–273. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.078>.
10. Richmann G.W. *Trudy po fizike* [Writings on Physics]. Moscow, Izd. Akad. Nauk SSSR, 1956. 711 p. (In Russian)
11. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Heat Transfer Principles]. 5th revis. and enlarged ed. Moscow, Atomizdat, 1979. 416 p. (In Russian)
12. Dul'nev G.N., Semyashkin Z.M. *Teploobmen v radioelektronnykh apparatakh* [Heat Transfer in Radio-Electronic Devices]. Leningrad, Energiya, 1968. 360 p. (In Russian)
13. Ryzhov A.A., Sudoplatov A.D. Calculation of the specific electrical conductivity of sandy-clayey rocks and the use of functional dependencies in solving hydrogeological problems. In: *Nauchno-tehnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt v oblasti geologii i razvedki nedr: Nauch.-tehn. inform. sb. VIEMS* [Recent Trends and Best Practices in Geology and Exploration: A Scientific and Technical Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute for Mineral Resources Economics and Geological Exploration], 1990, pp. 27–41. (In Russian)
14. Stromberg A.G., Semchenko D.P. *Fizicheskaya khimiya: ucheb. dlya khim. spets. vuzov* [Physical Chemistry: A Textbook for Chemistry Universities]. Moscow, Vyssh. Shk., 2001. 527 p. (In Russian)
15. Zaharov A.V., Ponomarev A.B. Monitoring of the temperature field of soils in Perm. *Vestn. PNIPU. Stroitel'stvo Arkhit.*, 2015, no. 4, pp. 103–112. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2015.4.08>. (In Russian)

16. Senov A.S. On a possible approach to hydrodynamic mapping of the post-salt strata in the Verkhnekamskoe potassium salt deposit. *Gorn. Zh.*, 2016, no. 4, pp. 48–51. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.04.09>. (In Russian)
17. Liu J., Lekhov A.V. Modeling changes in permeability characteristics of gypsified rocks accompanying brine flow. *Water Resour.*, 2013, vol. 40, no. 7, pp. 776–782. <https://doi.org/10.1134/S0097807813070063>.
18. Kilin Y.A., Min'kevich I.I., Zhulanov G.S. The chemical composition of groundwater in the Talitsky section of the Verkhnekamskoe salt deposit. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo* [Problems of Mineralogy, Petrography, and Metallogeny. Proc. Sci. Lect. in Memory of P.N. Chirvinsky], 2023, no. 26, pp. 108–116. <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2023.108>. (In Russian)
19. Krasilnikov P.A., Meshcheryakova O.Yu., Tatarkin A.V. Geoinformation-based approach to the assessment and prediction of changes in the geotechnical conditions in undermined territories. *Inzh. Geol.*, 2021, vol. XVI, no. 4, pp. 48–60. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-4-48-60>. (In Russian)
20. Kudryashov A.I. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie solei* [Verkhnekamskoe Salt Deposit]. 2nd revis. ed. Moscow, Epsilon Plyus, 2013. 371 p. (In Russian)
21. Gileva M.I., Tatarkin A.V., Filimonchikov A.A. Determining the electrical resistivity of dispersed soils in laboratory conditions. *Vestn. Permsk. Univ. Geol.*, 2014, no. 1 (22), pp. 44–48. (In Russian)
22. Kletskina O.V., Krasilnikov P.A., Tatarkin A.V. Hydrogeochemical assessment of the state of surface waters and identification of the area affected by of the waste disposal facility of the Kirovo-Chepetsk industrial complex. *Vestn. Permsk. Univ. Geol.*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 180–189. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.2.180>. (In Russian)

⟨ **Для цитирования:** Татаркин А.В., Красильников П.А. Температурный фактор при выделении зон субаквальной разгрузки приповерхностных вод // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2024. Т. 166, кн. 1. С. 169–182. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.169-182>. ⟩

⟨ **For citation:** Tatarkin A.V., Krasilnikov P.A. The temperature factor in selecting the areas of subaqueous discharge of near-surface water. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2024, vol. 166, no. 1, pp. 169–182. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.169-182>. (In Russian) ⟩