

УДК: 556.332.629

П.Ю. Василевский¹, Пин Ван²**ОЦЕНКА СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗ РУСЛА РЕКИ ПО ДАННЫМ СУТОЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ Р. ХЭЙХЭ (ВНУТРЕННЯЯ МОНГОЛИЯ, КИТАЙ)***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Китайская академия наук, Институт географических наук и исследования природных ресурсов,
100101, КНР, Пекин, район Чаоянг, улица Датун, 11А**Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1**Chinese Academy of Sciences, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,
100101, China, Chaoyang District, Datun Road, 11A*

Оценка скорости фильтрационных потерь из русел рек — важная задача для оценки взаимосвязи поверхностных и подземных вод и эффективного управления водными ресурсами, особенно в условиях аридного климата, где фильтрация из русел рек позволяет поддерживать состояние прибрежных экосистем. Один из методов оценки скорости фильтрации из русла реки — использование суточных колебаний температуры донных отложений. Для расчета скорости фильтрации из русла реки использованы данные мониторинга за температурой донных отложений в русле нижнего течения р. Хэйхэ (Северо-Западный Китай). Результаты расчетов скорости фильтрации сопоставлены с данными, полученными в ходе решения обратной задачи на одномерной модели тепло-влажнопереноса в донных отложениях по данным годового цикла наблюдений. Хорошее соответствие рассчитанных и модельных значений скорости фильтрации наблюдается при значительном разном (≥ 0,3 м) и глубине залегания ≥ 0,5 м температурных датчиков, по данным которых велся расчет скорости фильтрации.

Ключевые слова: взаимосвязь подземных и поверхностных вод, фильтрационные потери, русловые отложения, суточные колебания температур, река Хэйхэ, КНР.

Estimation of leakage from riverbeds is an important task to quantify the interaction of surface and groundwater and to perform effective water management under arid climate conditions, where the leakage from riverbeds helps to maintain the existence of riparian ecosystems. One of the methods to estimate the leakage rate from the riverbed is to use the daily temperature signals of riverbed sediments. In present paper, the continues measurements of riverbed sediments temperatures in the lower reaches of the Heihe river (North-Western China) are used to calculate the leakage rate from the riverbed. The obtained results of the leakage rate calculations are compared with the results of inverse problem solution on a one-dimensional model of heat and water flow. Good agreement of the calculated and model leakage rates is observed when a significant distance is found between temperature sensors (≥ 0,3 m) and between temperature sensors and riverbed surface (≥ 0,5 m).

Key words: Ground and surface water interaction, leakage, riverbed sediment, diurnal temperature signals, Heihe river, China.

Введение. В условиях аридного климата фильтрация из русел рек представляет собой основной источник питания подземных вод грунтовых водоносных горизонтов. Оценка параметров взаимосвязи между поверхностными и подземными водами представляет ключевую задачу в рамках решения экологических проблем прибрежных экосистем.

Температура — мощный трассер для количественной оценки взаимодействия поверхностных и подземных вод. Исследователи используют тепло в качестве трассера для количественной оценки взаимодействия подземных и поверхностных вод с 1960-х гг. Методы, использующие суточные тем-

пературные сигналы, стали активно развиваться сравнительно недавно — в начале XXI в. [Irvine et al., 2017]. Эти методы пользуются растущей популярностью, так как они позволяют оценивать взаимодействие подземных и поверхностных вод в случаях восходящей и нисходящей фильтрации, не требуют проведения долговременных полевых работ, характеризуются невысокой стоимостью. Нами метод соотношения амплитуд колебаний температуры донных отложений использован для расчета скорости фильтрации из русла реки. В задачи исследования входили: 1) расчет скорости фильтрации из русла р. Хэйхэ по данным ампли-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, аспирант; e-mail: valenciacf@mail.ru

² Китайская академия наук, Институт географических наук и исследования природных ресурсов, лаборатория водного цикла и связанных поверхностных процессов, профессор; e-mail: wangping@igsnr.ac.cn

туды колебания температуры донных отложений; 2) анализ полученных результатов и их сравнение с данными, полученными ранее с помощью альтернативных методов.

Теоретический анализ. Количественный расчет скорости водообмена между поверхностными и подземными водами с использованием суточных колебаний температуры донных отложений предполагает решение одномерного уравнения теплового переноса между двумя температурными датчиками с помощью аналитических или численных методов. Одномерное уравнение теплового переноса имеет следующий вид [Stallman, 1965]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k_e \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - q \frac{C_w}{C} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1)$$

где q — скорость фильтрации из русла реки, м/с; z — глубина, м; T — температура, °C; t — время, с; C_w — объемная теплоемкость воды, Дж/м³/°C; C — объемная теплоемкость водонасыщенных русловых отложений, Дж/м³/°C; k_e — температуропроводность водонасыщенных русловых отложений, м²/с.

На практике чаще используют аналитические методы оценки скорости по причине быстроты и удобства проведения расчетов. Существует ряд методов, основанных на аналитическом решении уравнения (1), полученном при гармоническом колебании температуры воды на верхней границе донных отложений. Эти методы используют либо соотношение амплитуд температуры, полученных с пары датчиков, либо сдвиг фаз колебаний температуры с пары датчиков, либо соотношение амплитуд и сдвиг фаз одновременно.

Аналитические решения уравнения (1) имеют ряд допущений: между двумя температурными датчиками поток подземных вод вертикальный и одномерный, поровое пространство русловых отложений однородно, изменение температуры русловых отложений и воды происходит одновременно, не существует значительного температурного градиента с глубиной, а теплофизические свойства отложений не зависят от температуры. Для получения четкого температурного сигнала необходимо наличие колебаний температуры воздуха и незатененного участка русла, а также наличие участка русла с глубиной не более 1,5 м [Irvine et al., 2017]. Опыт предыдущих исследований показал, что при глубине реки более 1,5 м температурные колебания при прохождении толщи воды затухают настолько, что их невозможно использовать для расчетов скорости фильтрации из русла реки. В случае нисходящей фильтрации температурные колебания распространяются вниз с помощью конвективного и кондуктивного переноса, и суточные сигналы различимы до глубины ~0,5 м. В случае восходящей фильтрации температурные колебания распространяются вниз от поверхности земли только с помощью кондуктивного переноса,

что обычно ограничивает глубину, на которой различим суточный температурный сигнал, до 0,2 м. Исследователи рекомендуют использовать более двух температурных датчиков на одной вертикали для большей вариативности при расчете [Irvine et al., 2017]. Расположение датчиков зависит от их размера и направления фильтрации. При восходящей фильтрации датчики должны быть расположены как можно ближе к поверхности русловых отложений и с небольшим интервалом (≤ 10 см). При нисходящей фильтрации датчики не должны быть расположены ближе 5 см. Оптимальная частота регистрации температуры составляет 1 раз в 10–20 минут, а длина температурного ряда — не менее 4 сут.

Методы, использующие амплитуду суточных колебаний, более устойчивы к несинусоидальному типу колебаний, условиям восходящей разгрузки и переменной величине разгрузки подземных вод, чем методы, использующие сдвиг фаз колебаний температуры или комбинированные методы. Поэтому для получения наиболее достоверных значений скорости водообмена рекомендуется использовать решения, использующие соотношение значений амплитуды суточных колебаний температуры, например, решение [Hatch et al., 2006]:

$$q = \frac{C}{C_w} \left(\frac{2k_e}{\Delta z} \ln A_r + \sqrt{\frac{\alpha + v_t^2}{2}} \right),$$

$$\alpha = \sqrt{v_t^4 + (8\pi k_e / P)^2}, \quad (2)$$

где $A_r = A_d/A_s$ — соотношение амплитуд колебаний температуры для пары датчиков, d и s — глубокое и мелкое расположения пары датчиков соответственно; Δz — расстояние между датчиками изменения температуры, м; $v_t = v_f/\gamma$ — скорость температурного фронта, м/с; v_f — скорость фильтрации, м/с; γ — соотношение теплоемкостей фильтрующейся воды и водонасыщенных донных отложений; P — период температурных колебаний (для суточных колебаний $P=1$ сут.).

Такое решение использовано нами для расчета скорости водообмена между поверхностными и подземными водами.

Описание объекта. Нижнее течение р. Хэйхэ (Северо-Западный Китай) характеризуется аридным климатом с потенциальным испарением ~1500 мм/год и величиной количества осадков, равной ~35 мм/год [Vasilevskiy et al., 2019]. Для района характерны резкие сезонные и суточные перепады температуры: средняя температура июля +26 °C, января — -9 °C. Основное питание подземных вод происходит за счет перетекания из русла р. Хэйхэ. Русло реки широкое и мелкое, в период с апреля по июнь, в ноябре русло в основном находится в сухом состоянии за последние 10 лет. Русло реки сложено песчаными отложениями. По

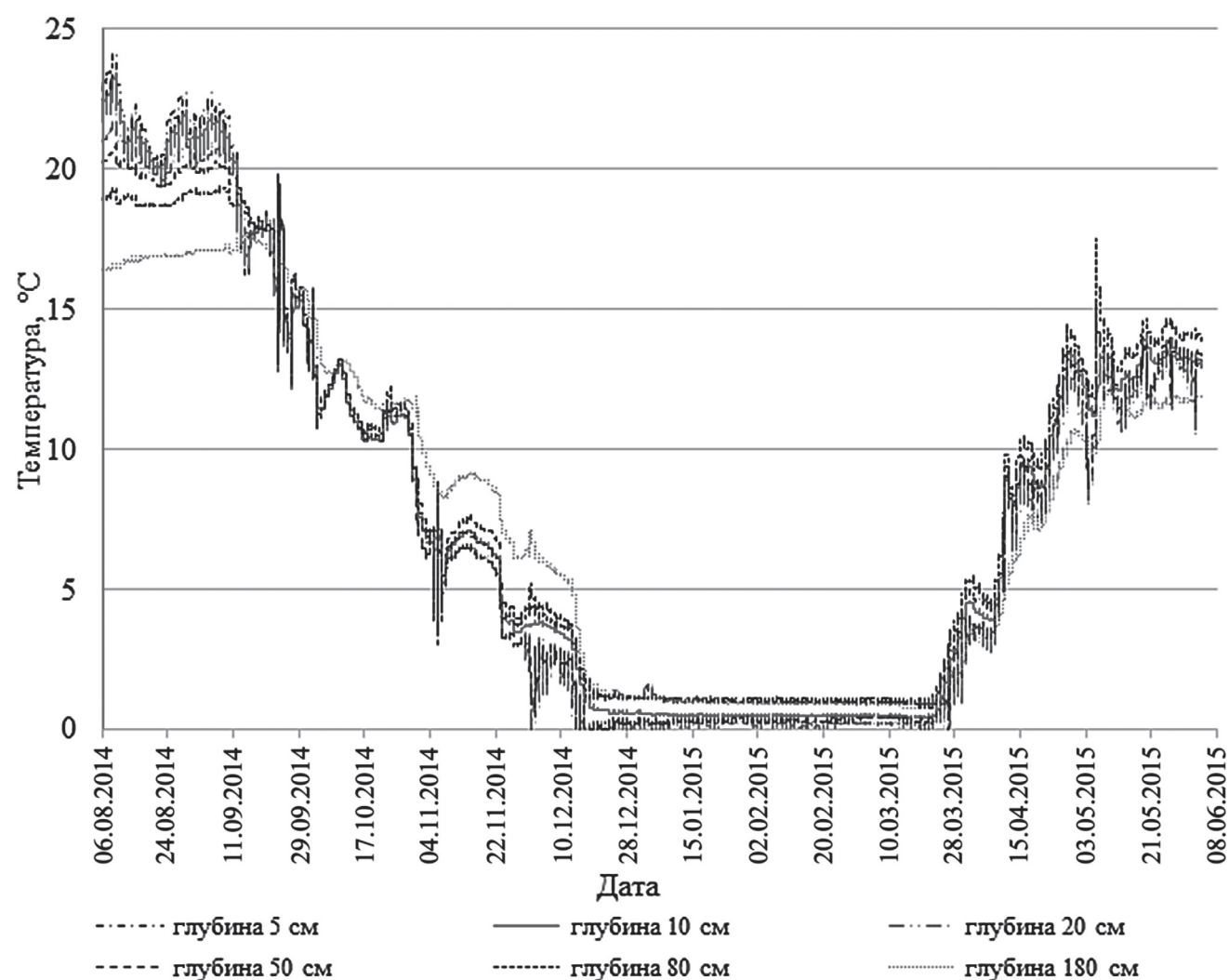


Рис. 1. Температура донных отложений по данным температурных датчиков для профиля Т1 в период с августа 2014 по июнь 2015 г.

классификации песков Е.М. Сергеева на глубине 0–10 см залегает песок чистый, бидисперсный, средне-мелкозернистый, на глубине 20–120 см — песок чистый, бидисперсный, мелко-среднезернистый [Wang et al., 2017]. Водоносный горизонт сложен песками разномелкозернистыми. Более подробное описание физико-географических и геолого-гидрогеологических условий нижнего течения р. Хэйхэ приведено в [Wang et al., 2017].

Материалы и методы исследований. Для расчета скорости фильтрации из русла реки использованы данные наблюдений за температурой донных отложений в нижнем течении р. Хэйхэ в 2014–2015 гг. Расположение профилей с температурными датчиками Т1 и Т2 показано в работе [Wang et al., 2017]. Температурные датчики были закреплены на пластиковых балках и заглублены в русловые отложения во время отсутствия стока в реке. Датчики РТ100 фиксировали температуру подрусловых отложений на глубине 5, 10, 20, 50, 80, 180 см с точностью до 0,2 °C с временным интервалом 60 мин в период с августа 2014 по июнь 2015 г. Значения температуры донных отложений

по данным датчиков на профиле Т1 за указанный выше период приведены на рис. 1, на нем видно, что в течение года температура русловых отложений изменяется в широких пределах — от 25 практически до 0 °C. Стабилизация температуры донных отложений около 0 °C в период с декабря по март объясняется частичным промерзанием русла реки.

В работе [Wang et al., 2017] в ходе решения обратной задачи на одномерных моделях тепло-массопереноса была определена скорость нисходящей фильтрации из русла реки, меняющаяся во времени в годовом цикле (для профиля Т1 — 314 сут, для профиля Т2 — 303 сут). Модели тепло-массопереноса представляли собой песчаные колонки мощностью 4,5 м, разбитые на слои, соответствующие литологическим разностям русловых отложений. Для фильтрации верхнее граничное условие (ГУ) — заданный напор/поток, нижнее ГУ — заданный напор. Для теплопереноса верхнее и нижнее ГУ — заданная температура. Среднегодовая скорость фильтрации составила $2,8 \cdot 10^{-6}$ м/с (0,24 м/сут). В качестве исходных данных для мо-

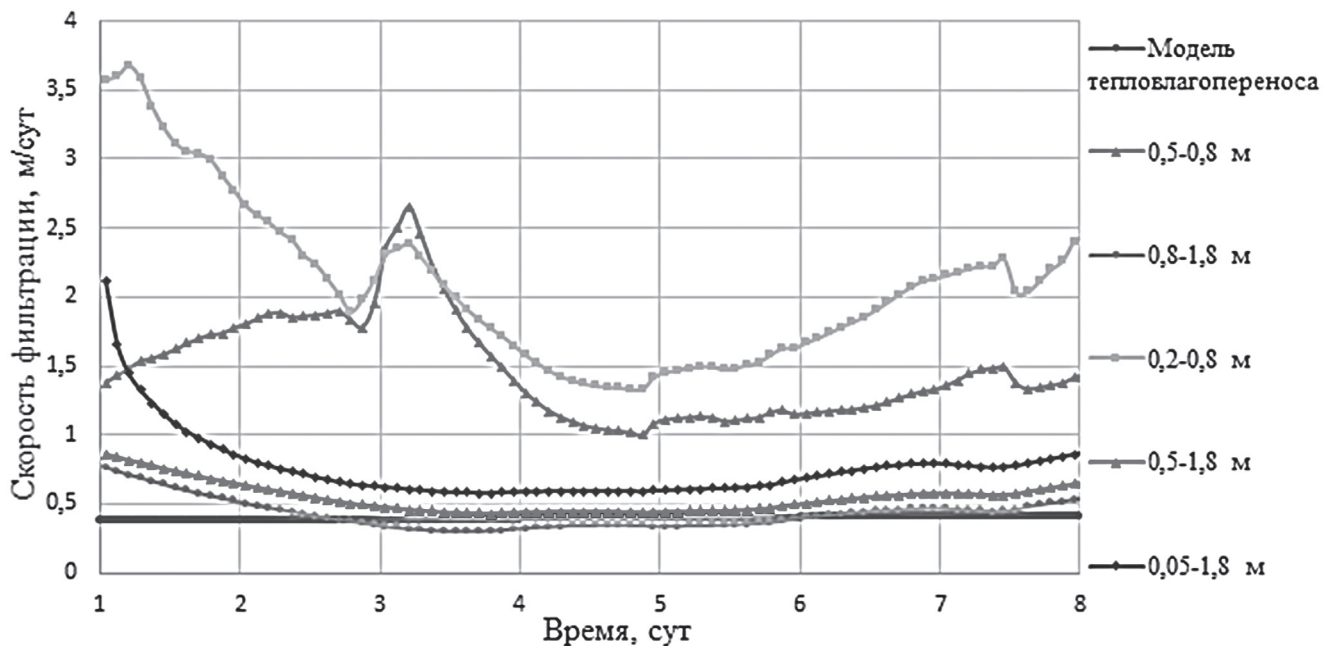


Рис. 2. Результаты расчетов скорости вертикального водообмена по данным о суточной амплитуде колебания температуры русловых отложений на профиле T1 в сравнении с результатами определения скорости фильтрации на одномерной модели теплового переноса [Wang et al., 2017]. Положительная скорость фильтрации соответствует нисходящему потоку из русла реки. Пары цифр обозначают датчики на разной глубине

делей были использованы значения температуры донных отложений, подземных и поверхностных вод, а также уровни подземных и поверхностных вод с суточным разрешением. Гидрофизические и теплофизические параметры русловых отложений были выбраны по результатам полевых опробований и литературным данным.

Одно из преимуществ количественной оценки водообмена между подземными и поверхностными водами с использованием суточных колебаний температуры донных отложений заключается в наличии ряда общедоступных программ для вычислений. Одна из таких программ, использованная нами, — код VFLUX [Gordon et al., 2012]. Код VFLUX позволяет вычислить скорость водообмена с использованием решения (2) одномерного уравнения теплопереноса (1). Этот код также позволяет вести предварительную обработку температурных данных (метод динамической гармонической регрессии).

Расчеты проводились следующим образом: за выбранные периоды времени, приведенные в табл. 1, использованы данные пары температурных датчиков одного из профилей (T1 или T2). Для расчетов были выбраны периоды, отвечающие следующим критериям: наличие воды в русле реки, отсутствие резких колебаний уровня поверхностных вод, наличие суточных колебаний температуры русловых отложений с амплитудой больше точности температурных датчиков. Расчеты выполнены с помощью кода VFLUX. В программе задавался временной ряд температурных наблюдений по данным датчиков на разной глубине (рис. 1). Из введенных температурных рядов про-

грамма автоматически выделяла периодический сигнал и рассчитывала амплитуду температурных колебаний. По совпадению наблюдаемых и модельных температурных рядов подбирались величина и направление фильтрации через русловые отложения.

Таблица 1

Выбранные периоды наблюдений для расчета значения скорости водообмена

Номер периода	Профиль	Даты	Длительность, сут
1	T1	21.09.2014–28.09.2014	8
2	T2	18.09.2014–24.09.2014	7

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты расчетов скорости вертикального водообмена приведены в сравнении с результатами решения обратной задачи на одномерных моделях теплового переноса [Wang et al., 2017] для профиля T1 на рис. 2, для профиля T2 — на рис. 3.

На рис. 2, 3 видно, что по результатам расчетов скорость нисходящей фильтрации из русла реки имеет значения от 0,37 до 2,09 м/сут в зависимости от профиля и используемой для расчета пары температурных датчиков. Осредненные результаты расчета скорости фильтрации за выбранные периоды в сравнении с полученными по модели теплового переноса для профиля T1 приведены в табл. 2, для профиля T2 — в табл. 3.

Из данных, приведенных в табл. 2, 3, видно, что наилучшее совпадение скорости фильтрации с модельными данными (относительная погрешность 10–20%) получается при использовании

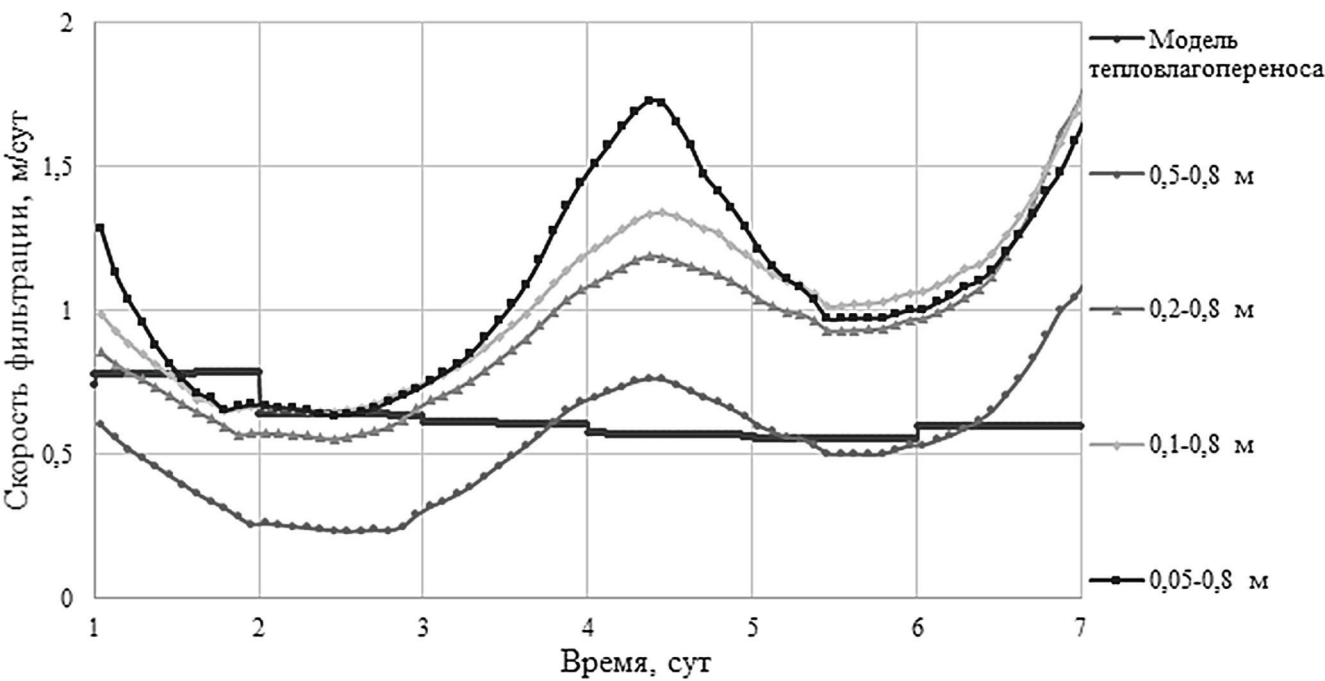


Рис. 3. Результаты расчетов скорости вертикального водообмена по данным о значениях суточной амплитуды колебания температуры русловых отложений на профиле Т2 в сравнении с результатами определения скорости фильтрации на одномерной модели тепло-влажностного переноса [Wang и др., 2017]. Положительная скорость фильтрации соответствует нисходящему потоку из русла реки. Пары цифр обозначают датчики на разной глубине

Таблица 2

Результаты расчета средней скорости фильтрации по данным значений суточной амплитуды колебания температуры русловых отложений на профиле Т1 в сравнении с результатами определения скорости фильтрации на одномерной модели тепло-влажностного переноса [Wang et al., 2017]

Средняя скорость фильтрации, м/сут	Модель тепло-влажностного переноса	Глубина заложения пары датчиков, м				
		0,5–0,8	0,8–1,8	0,2–0,8	0,5–1,8	0,05–1,8
	0,39	1,47	0,43	2,09	0,54	0,76

Таблица 3

Результаты расчета средней скорости фильтрации по данным значений суточной амплитуды колебания температуры русловых отложений на профиле Т2 в сравнении с результатами определения скорости фильтрации на одномерной модели тепло-влажностного переноса [Wang et al., 2017]

Средняя скорость фильтрации, м/сут	Модель тепло-влажностного переноса	Глубина заложения пары датчиков, м			
		0,5–0,8	0,1–0,8	0,2–0,8	0,05–0,8
	0,62	0,53	0,37	1,02	1,07

пары датчиков, разнесенной по глубине на достаточное расстояние, и при использовании датчиков, расположенных на глубине 50 см и более (пары датчиков на глубине 0,8–1,8 и 0,5–1,8 на профиле Т1 и 0,5–0,8 на профиле Т2). Разнос датчиков по глубине необходим для появления четко выраженной разницы в амплитуде колебаний температуры. В таких условиях разнос температурных датчиков должен быть >0,3 м. Использование датчиков, расположенных близко к поверхности русловых

отложений (глубина 0,05–0,2 м), ведет к значительному завышению расчетной скорости фильтрации по сравнению с модельной. Это обстоятельство можно объяснить наличием перетока фильтрующейся жидкости из-за неплотного прилегания температурных датчиков к русловым отложениям. При увеличении глубины температурные датчики прижимаются к грунту плотнее, и скорость фильтрации уменьшается до естественных значений. Кроме того, датчики, расположенные близко к поверхности, подвержены влиянию процессов смыва и накопления русловых отложений, что также делает их использование для расчетов скорости фильтрации некорректным.

Заключение. В результате расчетов скорости фильтрации из нижнего течения русла р. Хэйхэ по данным суточных колебаний амплитуды температуры русловых отложений получены значения от 0,37 до 2,09 м/сут в зависимости от профиля и используемой для расчета пары температурных датчиков. Хорошее совпадение с полученными на модели тепло-влажностного переноса значениями (относительная погрешность определения скорости фильтрации 10–20%) наблюдается при достаточном разнесе температурных датчиков по глубине (>0,3 м). Аномально высокие значения скорости фильтрации получены при использовании для расчетов неглубоко залегающих температурных датчиков (глубина <0,2 м), что объясняется перетоком из-за неплотного прилегания датчиков к русловым отложениям и влиянием процессов смыва и накопления русловых отложений. В целом использование суточных колебаний температур

донных отложений может быть рекомендовано в качестве одного из методов количественной оценки скорости водообмена между поверхностными и подземными водами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Gordon R.P., Lautz L.K., Briggs M.A., McKenzie J.M. Automated calculation of vertical pore-water flux from field temperature time series using the VFLUX method and computer program // *Hydrology J.* 2012. Vol. 420. P. 142–158.

Hatch C.E., Fisher A.T., Revenaugh J.S. et al. Quantifying surface water-groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: Method development // *Water Res.* 2006. Vol. 42, N 10. P. 1–14.

Irvine D.J., Briggs M.A., Lautz L.K. et al. Using diurnal temperature signals to infer vertical groundwater-surface water exchange // *Groundwater J.* 2017. Vol. 55, N 1. P. 10–26.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта совместного конкурса фундаментальных проектов РФФИ — ГФЕН (проект №18-55-53025 ГФЕН_a, 41811530084).

Stallman R.W. Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature // *J. Geophysical Res.* 1965. N 12. P. 2821–2827.

Vasilevskiy P.Yu., Wang Ping, Pozdniakov S.P., Davis P. Revisiting the modified Hvorslev formula to account for the dynamic process of streambed clogging: Field validation // *Hydrology J.* 2019. Vol. 568. P. 862–866.

Wang Ping, Pozdniakov S.P., Vasilevskiy P.Yu. Estimating groundwater-ephemeral stream exchange in hyper-arid environments: Field experiments and numerical simulations // *Hydrology J.* 2017. Vol. 555. P. 68–79.

Поступила в редакцию 05.04.2019

Поступила с доработки 25.04.2019

Принята к публикации 25.04.2019