

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 550.34.013.4:550.34.013.2

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА К КОДУ FEEFLOW ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАКАЧКИ РАССОЛОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ПОРОДЫ

© 2024 г. И. А. Расторгуев^{1,2,*}, И. В. Литвинова^{2,**}, Н. А. Иост², А. В. Ильин²

¹НИЦ “Курчатовский Институт”, пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123098 Россия

²АК “Алроса”, ул. Советская, 5, Новосибирск, 630007 Россия

*E-mail: stiar@mail.ru

**E-mail: LitvinovaIV@alrosa.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 24.11.2023 г.

Принята к публикации 05.02.2024 г.

На момент написания статьи не существует готовых программных кодов для расчета процессов тепломассопереноса и фильтрации в многолетнемерзлых породах (ММП). Существующие программы не решают задачи растепления (плавления) льда при растворении закачанными рассолами. В статье предлагается решение такой задачи, с использованием нового кода (FreezeThaw75), разработанного одним из авторов для расчета тепло- и массопереноса с учетом фазовых переходов вода–лед и лед–вода–вода. Модуль FreezeThaw75 разработан на C++ применительно к модельной среде Feflow v7.4-7.5. Проведена верификация работы модуля – сравнение расчетов с аналитическим решением и другими программными кодами. Показана функциональность модуля при апробации на модели закачки рассола в мерзлые породы на одном из участков закачки в Далдыно-Алакитском районе Якутии. Особенностью расчетов в созданной модели является учет больших закачиваемых объемов высокоминерализованных рассолов (с минерализацией до 400 г/л). При взаимодействии с породами рассолы способствуют деградации льдистой составляющей ММП. При проектировании полигона закачки учитывают криогидрогеологические условия участка. Закачка производится в толщу ММП с высокой поглощающей способностью, особенно в районах, приуроченных к зонам тектонических нарушений. Разработанный модуль позволяет корректировать прогнозируемый потенциал эксплуатируемых участков закачки, а также может использоваться в качестве дополнительного элемента контроля процесса закачки и формирования техногенного водоносного горизонта в толще ММП.

Ключевые слова: *тепломассоперенос, модуль FreezeThaw75, фазовые переходы, Далдыно-Алакитский район, фильтрационная модель, многолетнемерзлые породы, высокоминерализованные рассолы, коэффициент фильтрации, C++*

DOI: 10.31857/S0869780924020055; EDN: DZQFAP

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент времени ведется разработка программных продуктов, позволяющих решать задачи геофильтрации в многолетнемерзлых породах (ММП). Как правило, эти коды учитывают процессы теплопереноса без массопереноса. Обзор этих разработок дан в статье [11]. Расчеты фильтрации с учетом тепломассопереноса в ММП опубликованы в работах российских специалистов [7–9]. Эти работы рассматривают одномерные условия фильтрационного потока.

В стандартной версии программной среды DHI Feflow нет возможности моделирования

многомерного тепломассопереноса и промерзания с учетом фазовых переходов. Однако возможности Feflow выполнять расчеты фильтрации в области отрицательных температур могут быть расширены с помощью средств программирования, позволяющих разрабатывать дополнительные модули, необходимые пользователю.

Предлагаемый модуль может быть использован при расчете многомерных задач фильтрации и тепломассопереноса. Его особенностью является подключение как внешней библиотеки DLL в среду DHI Feflow [13]. Также дорабатывается возможность подключения расчетов в области ММП к кодам MODFLOW.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Существуют различные способы утилизации дренажных вод. Самые распространенные из них — это накопление в искусственных водоемах. Некоторые предприятия обосновывают закачку в глубокие горизонты. Каждая организация, в зависимости от условий эксплуатации, выбирает наиболее экологически безопасный режим утилизации.

Одним из таких способов утилизации дренажных рассолов была выбрана закачка в ММП. Возможность использования криогенных геологических структур и подмерзлотных водоносных горизонтов в криолитозоне для захоронения высокоминерализованных вод с минерализацией до 400 г/л зависит от региональных мерзлотно-гидрогеологических условий. Эти условия определяют зависимость природных резервуаров от фильтрационно-емкостных свойств поглощающего криогенного или водоносного горизонта, а также от мощности и текстурных особенностей перекрывающего мерзлотного экрана [2].

Для закачки дренажных рассолов в криогенные структуры используются преимущественно участки повышенной трещиноватости. Процесс закачки дренажных вод приводит к высвобождению дополнительного объема пустотности в ММП и образованию техногенного водоносного горизонта. Происходит увеличение емкостных показателей пород и их фильтрационной проницаемости [2, 3]. Дополнительные емкостные параметры ММП на участках закачки формируются главным образом в результате фазового перехода воды из твердого состояния в жидкое при плавлении льда рассолами. Естественная (открытая) пустотность мерзлого массива низкая и не превышает первых процентов от общей потенциальной емкости резервуара.

Как показывает практика и многолетний положительный опыт на разных месторождениях, использование таких участков для удаления дренажных вод — реализованное направление [1–6].

В связи с активной разработкой территории, получением нового материала за последние 20 лет и увеличением объемов закачки, возникает необходимость систематизации и анализа накопленных данных. Эти работы требуют проведения компьютерных расчетов пластовых процессов и создания численных моделей геофильтрации для реконструкции изменений условий эксплуатации объекта разработки.

Созданные модели должны способствовать выбору экономически целесообразного варианта эксплуатации, который позволит обеспечить разумное вложение средств при экономически допустимых затратах.

МЕТОДИКА

Влияние промерзания на проницаемость

В решении задач, когда необходимо учитывать движение потока подземных вод, важен учет влияния промерзания на проницаемость коллектора. Основная идея учета влияния промерзания на проницаемость грунтов заключается в том, что при достижении температур ниже температуры замерзания воды происходит уменьшение значений коэффициентов фильтрации. Так, в работе [2] предлагается постепенное изменение проницаемости при переходе температуры через ноль. Степень перехода в этих статьях предлагается равной уменьшению коэффициентов фильтрации на несколько порядков. В предлагаемой нами модели, реализованной с помощью модуля FreezeThaw75, переход от талого состояния грунта к мерзлоте осуществляется для случая, когда все узлы элементарной ячейки модели имеют температуру ниже температуры замерзания.

Сложность задачи заключалась в том, что в программе FEFLOW отсутствовала возможность учета промерзания и изменения теплофизических свойств грунтов в результате этого. Однако такая возможность была реализована в отдельном программном коде на C++ с использованием API функций библиотеки IFM FEFLOW и включена в модель в среде FEFLOW в виде динамически подключаемого модуля FreezeThaw75. Это позволило учесть переход от талого состояния к мерзлоте при переменной влагонасыщенности.

Основные уравнения

Разработанный модуль позволяет проводить расчеты на основе решения замкнутой системы уравнений фильтрации и теплопереноса.

Предполагая насыщенно-ненасыщенные условия и наличие фазовых переходов, фильтрация подземных вод рассчитывается с помощью (1):

$$Q_f = \nabla(\vec{q}) + n \frac{\partial(s_w)}{\partial t} + s_w S_o \frac{\partial(h)}{\partial t}. \quad (1)$$

Теплоперенос, распределение температур и теплота плавления льда учитываются в подземной среде и вычисляются на основе (2):

$$\nabla(\lambda \nabla T) - C_w \nabla \vec{q} T + Q_h = C_a \frac{\partial T}{\partial t} + L_i \frac{\partial \theta_w}{\partial t}. \quad (2)$$

Влагонасыщенность в зависимости от температуры (3) задается с помощью эмпирического уравнения [12]:

$$s_w = (1 - s_{wres}) e^{(-T/W)^2} + s_{wres}. \quad (3)$$

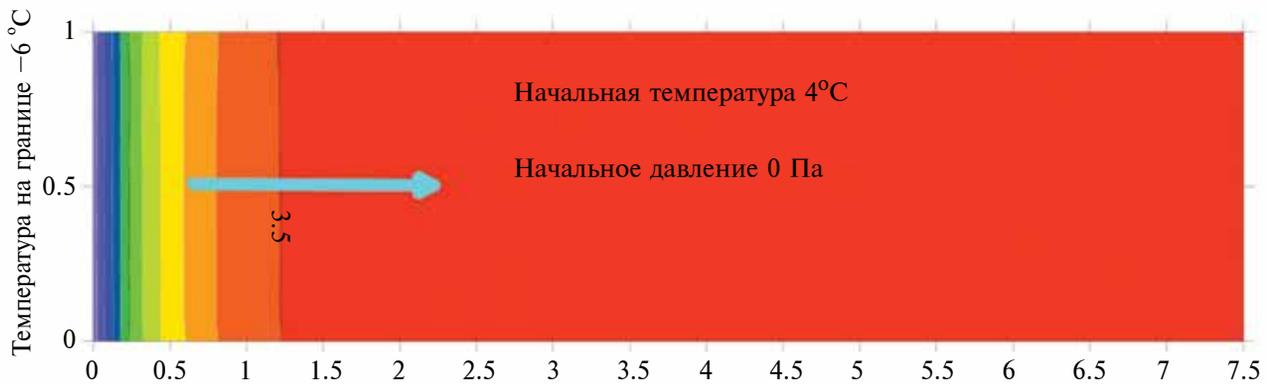


Рис. 1. Постановка задачи Лунардини.

Массоперенос оценивается следующим образом (4):

$$\theta_w \nabla(D \nabla C) - \nabla \vec{q} C + Q_t = \frac{\partial(\theta_w C)}{\partial t}. \quad (4)$$

Вариант вычисления относительной проницаемости в зависимости от влагонасыщенности (5):

$$K_{rw} = 10^{-\Omega(1-s_w)^n}. \quad (5)$$

Коэффициенты теплопроводности и теплоемкости для твердой фазы, учитывающие льдистость, вычисляются по (6):

$$\lambda = n \cdot s_w \lambda_w + n(1-s_w) \lambda_i + (1-n) \lambda_s,$$

$$C_a = n \cdot s_w \rho_w C_w + n(1-s_w) \rho_i C_i + (1-n) \rho_s C_s. \quad (6)$$

В уравнениях (1)–(6):

$$q = -K_{rw} K \nabla \left(\frac{\rho_w}{\mu} \left(\vec{h} + \frac{\rho_w - \rho_0}{\rho_w} \right) \right) g -$$

скорость Дарси, [м/сут]; n – пористость, [д.е.]; h – напор, [м]; T – температура, [К]; ρ_0, ρ_w – плотности для пресной воды и воды в зависимости от концентрации солей, [кг/м³]; ρ_i, ρ_s – плотности для льда и породы, [кг/м³]; g – ускорение силы тяжести, [м/с²]; $S_w = \theta_w/n$ – влагонасыщенность, [д.е.]; θ_w – объемная влажность, [д.е.]; S_{wres} – остаточная влагонасыщенность, [д.е.]; S_o – удельная упругоёмкость, [1/м]; μ – динамическая вязкость жидкой фазы, [Па с]; L_i – удельная теплота плавления льда, [Дж/кг]; C – концентрация солей в жидкой фазе, [мг/л]; D – тензор гидродинамической дисперсии, [м²/сут]; Ω – показатель сопротивления, д.е.; W – эмпирический параметр, задающий интервал фазового перехода между твердым и талым состояниями воды, [К]; K_{rw}, K – относительная проницаемость и собственная проницаемость породы, соответственно

[д.е.], [м²]; $\lambda_w, \lambda_i, \lambda_s$ – коэффициент теплопроводности воды, льда и породы, [Вт/м/К]; C_w, C_a, C_i, C_s – теплоемкость воды, твердой фазы, льда, породы, [Дж/м/К]; Для проверки достоверности результатов, полученных с помощью разработанного программного средства, были выполнены тестовые расчеты, результаты которых приведены ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Промерзание при отсутствии фильтрационного потока

Для постановки данных условий учитываются фазовые переходы в насыщенной пористой среде при отсутствии гидродинамического потока. Для таких условий имеется аналитическое решение Лунардини [11].

На рис. 1 приведена постановка этой задачи. Изначально в горизонтальной модельной области задана температура +4°C. На левой границе задана постоянная температура –6°C, приводящая к постепенному промерзанию. В аналитической модели оцениваются термодинамическое влияние левой границы и распространение промерзания во времени. На рис. 2 приведено сопоставление расчетов на основе модуля FreezeThaw75 с аналитическим решением на момент времени 1 сут.

Промерзание при наличии фильтрационного потока

Такая модельная задача была предложена при разработке программы SUTRA [10, 11]. Двумерная напорная фильтрация решается в прямоугольной области размером 10 м по вертикали и 50 м по горизонтали при наличии слабопроницаемой стены в грунте с постоянной температурой ниже точки замерзания воды и являющейся преградой

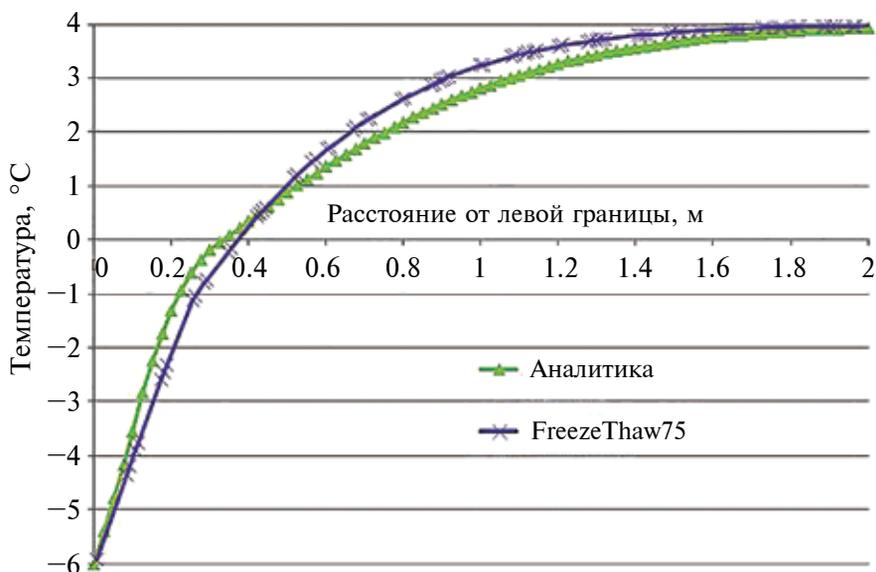


Рис. 2. Сопоставление аналитического расчета и расчета с помощью модуля FreezeThaw75.

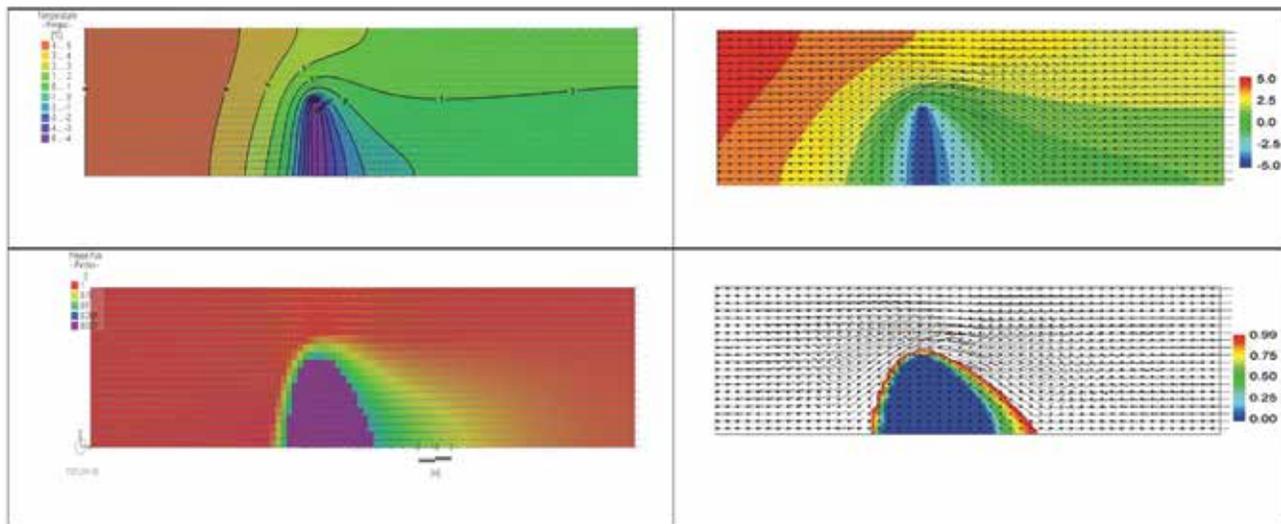


Рис. 3. Сопоставление расчетов на модуле FreezeThaw75 (слева) и SUTRA (справа). Верхний ряд – сопоставление по температуре, нижний – по влагонасыщенности.

фильтрационному потоку. Течение жидкости вызвано перепадом давления между левой и правой границей, на которых заданы ГУ1 с постоянным напором и перепадом 0.05 м между ними. Постоянная температура на левой границе принимается равной +5°C. Стена в грунте внутри модельной области поддерживается при температуре -5°C. Начальная температура всей модельной области +5°C. Дискретизация – равномерная прямоугольная с шагом 0.5 м. Продолжительность моделирования устанавливается равной 800 сут, в течение которых достигается равновесное состояние. Результаты сопоставления расчетов температур и насыщенностей, выполненных с помощью разработанного модуля и программой SUTRA, показаны на рис. 3. Расхождения можно объяснить

особенностями сеточной аппроксимации каждой из программ.

Тепломассоперенос, фазовые переходы и фильтрационный поток

Для верификации работы модуля на задачах, где учитывается тепломассоперенос и фазовые переходы, было произведено сопоставление с расчетами, проведенными авторами статьи [12]. В статье [12] рассматривалась профильная модель, разработанная в программе FlexPDE. В ней учтена зона ММП небольшой мощности и характерные для нее фильтрационные и температурные условия. Задана толщина сезонно-талого слоя

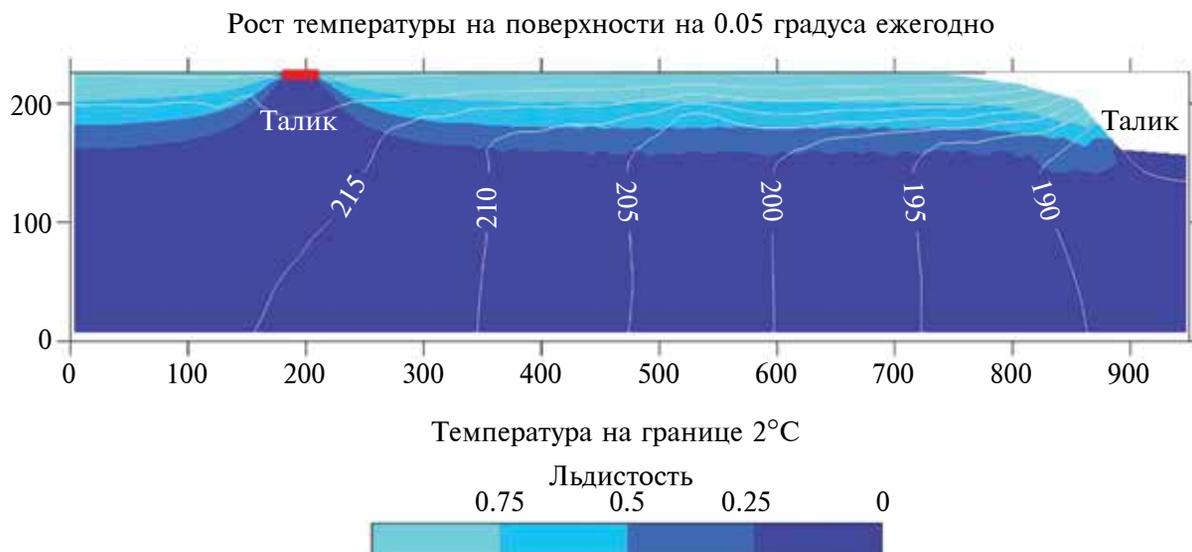


Рис. 4. Начальные и граничные условия для задачи тепломассопереноса. Сине-голубой заливкой показана начальная льдистость, изолиниями – начальные напоры, красной – начальная концентрация промстоков 100 мг/л.

и талики. Один из таликов образовался за счет утечек муниципальных сточных вод (содержащих в своем составе хлориды), которые разгружаются в другой талик, образованный урезом реки. За счет минерализации снижается температура замерзания, которая изначально равна 0°C для пресной воды. Повышенные концентрации растворенных веществ снижают температуру замерзания поровой воды. Процесс оттаивания, как под действием тепла, так и из-за термоосмотического сдвига за счет растворенных в воде веществ уменьшает содержание льда в ММП и увеличивает их проницаемость.

Рассматриваемая область тестовой модели предполагает начальное распределение уровней согласно рельефу (верхняя граница модели) (рис. 4). Рельеф участка имеет пологий уклон к реке на юго-восток. Основание и вертикальные стороны модели представляют собой непроницаемые фильтрационные границы. В основании модели (т.е. ниже подошвы ММП) была задана постоянная температура +2°C. Вертикальные границы непроницаемы для теплопереноса. На верхней границе задано увеличение температуры на дневной поверхности на 0.05°C ежегодно в течение 100 лет. Начальное распределение таликов, уровней и мощности зоны ММП было задано исходя из данных мониторинга. Над таликом на поверхности в левой части задан источник в виде концентрации 100 мг/л.

На рис. 5 приведено сопоставление расчетов тепломассопереноса с помощью модуля FreezeThaw75 и результатов расчета из статьи [12].

Расчеты выполнены при одинаковых условиях по фильтрации, тепло- и массопереносу. В качестве мигрирующего компонента рассматривается

сценарий миграции хлоридов с максимальной концентрацией 100 мг/л. Если вода имеет повышенную минерализацию, то происходит депрессия температуры замерзания, которая может быть оценена следующим образом. Зависимость температуры замерзания T_f (°C) от минерализации C (мг/л) предлагается рассмотреть по следующей зависимости [12]:

$$T_f = \begin{cases} C \geq 50 \text{ мг/л,} & -0.08C + 4 \\ C < 50 \text{ мг/л,} & 0 \end{cases} \quad (7)$$

Различие в расчетах объясняется тем, что в статье [12] используется динамическое адаптивное измельчение сетки. Размеры ячеек и дискретность по вертикали во время моделирования могут варьироваться на несколько порядков.

Результаты моделирования режима закачки крепких рассолов на опытном участке

После верификационных расчетов модуль FreezeThaw75 опробован на одном из участков отведения рассолов в многолетнемерзлые породы в Далдыно-Алакитском районе Якутии.

Для модельного обоснования закачки рассолов применялись два подхода. Первый, наиболее простой, основан только на фильтрационной модели с параметрами, полученными по результатам мониторинга на объекте. Второй, более сложный, предполагает совместное использование модели геофильтрации и тепломассопереноса с фазовыми переходами.

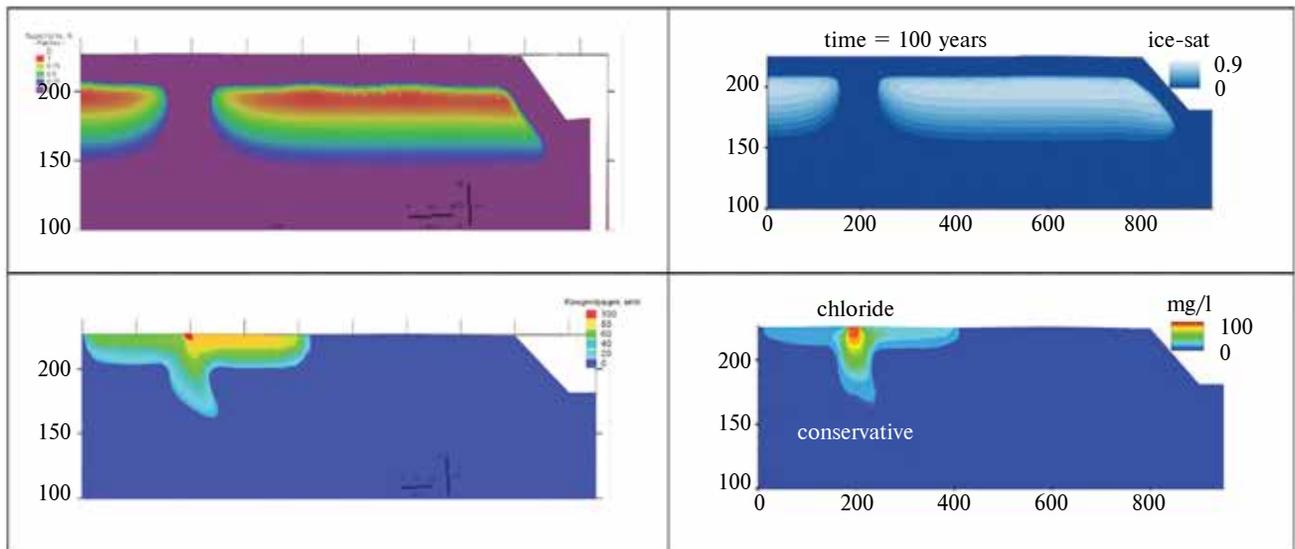


Рис. 5. Сопоставление расчетов тепломассопереноса в FreezeThaw75 (слева) и расчетов из [12] (справа). Сверху льдистость, внизу концентрация хлоридов.

Методы построения фильтрационных моделей

Подход, основанный на использовании только фильтрационных моделей, применялся специалистами различных научно-исследовательских предприятий, а также авторами данной статьи, при этом:

- задавались завышенные фильтрационные и емкостные параметры пород на участках в зоне закачки, не изменяемые из-за плавления льда;

- вне влияния области закачки фильтрационные параметры задавались в несколько раз меньше. Выбор способов уменьшения параметров вне зоны закачки был произвольным.

Опыт построения фильтрационных моделей одного и того же участка на основе различного программного обеспечения показал, что при едином подходе получены расхождения в оценке конечных объемов закачки. Для расчетов использовали ПО Modflow/GMS и FEFLOW. Закачка рассолов осуществлялась в ММП. Калибровка выполнялась в нестационарных условиях.

Использование только фильтрационных расчетов показало, что невозможно точно откалибровать все условия участка и спрогнозировать переполнение закачки, так как не учитываются миграция рассолов, условия криолитозоны и увеличение фильтрационных и емкостных свойств при растворении льда рассолами.

Модель тепломассопереноса для участка закачки

Второй подход при моделировании применялся авторами и заключался в применении расчетов с учетом тепломассопереноса (ТМП) и фазовых

переходов лед–вода и вода–лед. При расчете использовался модуль FreezeThaw75.

В отличие от только фильтрационного подхода, калибровка с учетом тепломассопереноса позволила более точно откалибровать модель. Это было достигнуто за счет изменения проницаемости, пористости, льдистости и параметров теплопроводности.

Моделирование закачки рассолов

В соответствии с зональностью фильтрационных свойств ММП в разрезе и необходимостью учета напоров верхнекембрийского водоносного комплекса (ВВК) в подмерзлотной толще пород, модель разделили на две части: верхняя – ММП, нижняя – ВВК (рис. 6, 7). Начальный уровень свободной поверхности +165 м. По границам заданы непроницаемые граничные условия. Влияние ручьев и инфильтрации на образующийся техногенный водоносный горизонт не учитываются, так как на участке закачки отсутствуют сквозные таликовые зоны.

Объем закачанных рассолов за весь период составил почти 22 млн м³. Для закачки были пробурены 18 скважин: 12 – западного ряда, и 6 – восточного. Заданы расходы в соответствии с режимом закачки на 10-летний период (см. рис. 6). Температура рассолов задавалась постоянной –5°C. Концентрация закачиваемого рассола до 350 г/л. Фоновая концентрация рассолов ВВК рассолов 100 г/л. Фоновая температура массива ММП –2°C. Для минимизации численной дисперсии модельные слои были раздроблены по вертикали.

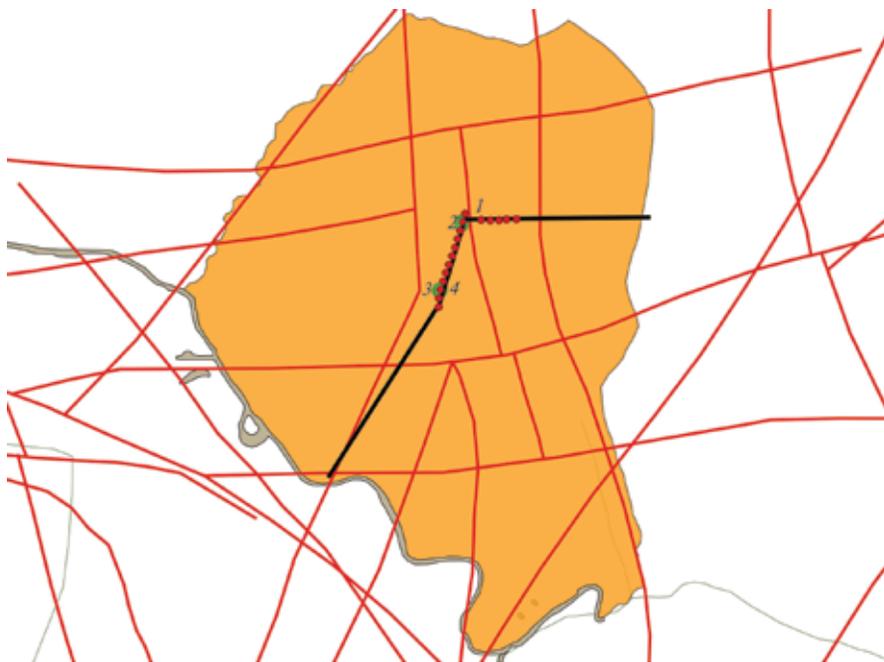


Рис. 6. Схема расположения объекта моделирования с системой разломов (красные линии). Скважины: закачки – красные кружки, наблюдательные – зеленые; цифры – номера скважин. Линия разреза показана черным цветом.

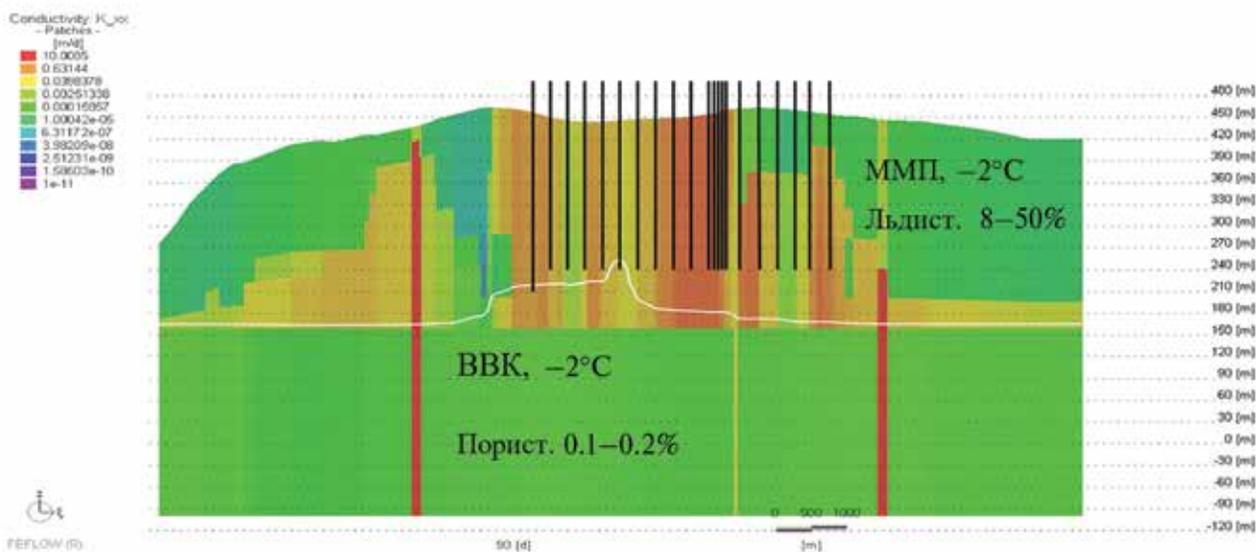


Рис. 7. Схема разреза. Слева – южная часть модели, справа – восточная. Черные линии – скважины, белая линия – кривая репрессии, заливка – коэффициент фильтрации через 3 мес. после начала закачки.

В процессе моделирования выполнялась калибровка параметров. Проводилось сопоставление фактических и расчетных уровней. Сопоставление фактических и расчетных уровней по моделям фильтрации и ТМП показано на рис. 8. Отмечается более качественное совпадение фактических

и расчетных уровней для модели с применением ТМП. Далее этот подход применялся для оценки оставшейся емкости после закачки, и был проведен расчет эксплуатации участка закачки. Результаты расчета показаны на рис. 9.

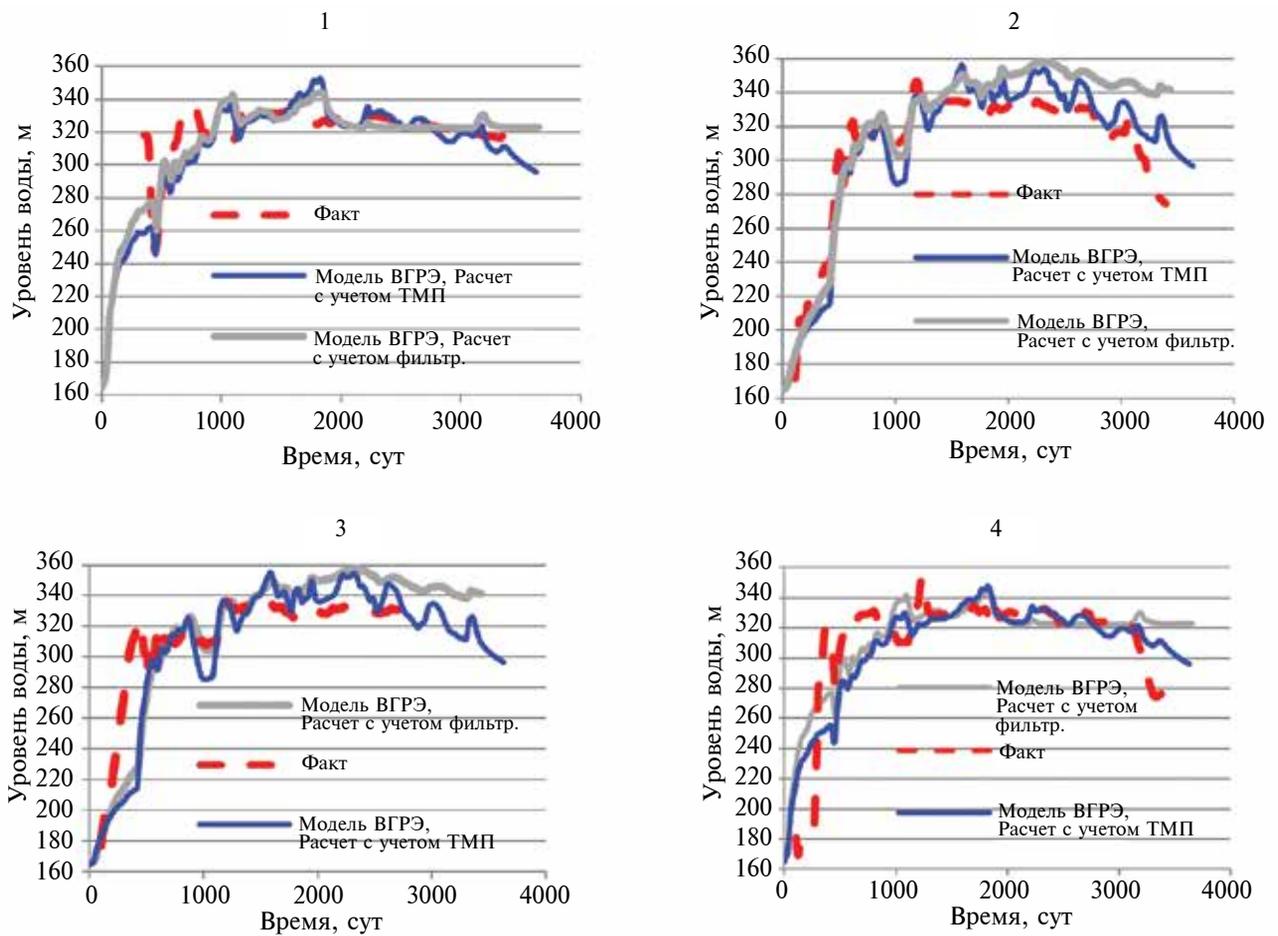


Рис. 8. Сопоставление фактических и расчетных уровней по ближайшим к закачным скважинам пьезометрам №№ 1–4.

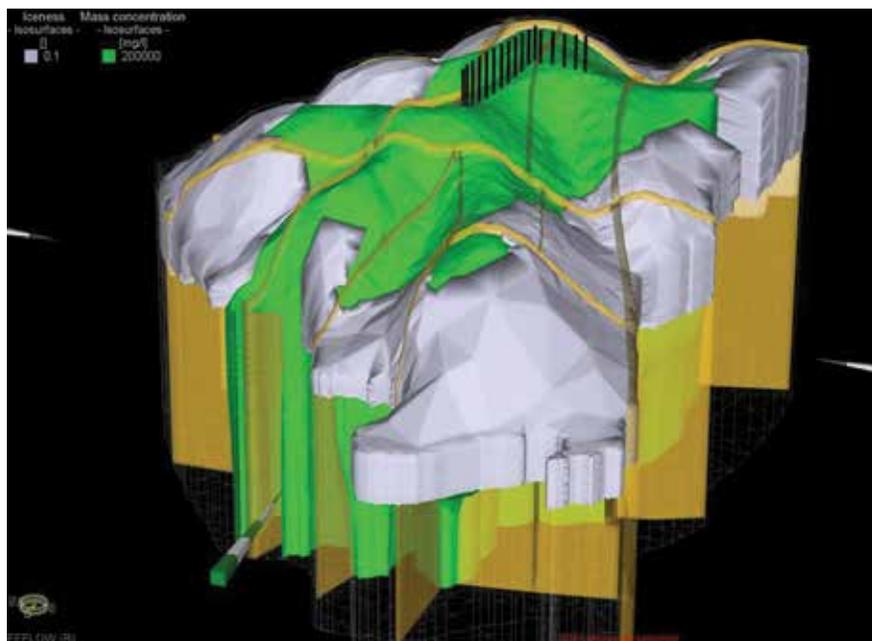


Рис. 9. Результаты расчета закачки в течение 2013–2022 гг. Желтым показаны разломы, зеленым – ореол минерализации 200 г/л, белым – не размороженная часть.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный модуль FreezeThaw75 позволяет решать задачи тепломассопереноса и фазовых переходов (лед—вода и вода—лед).

Для проверки достоверности результатов было выполнено сопоставление с:

– аналитическим решением задачи теплопроводности с учетом фазовых переходов в отсутствие фильтрационного потока;

– численным решением задачи с обтеканием замороженной стены в грунте, полученным с помощью сторонней программы SUTRA;

– численным решением задачи тепломассопереноса с фазовыми переходами и фильтрационным потоком, полученным с помощью кода FlexPDE.

Используя разработанный модуль FreezeThaw75, построена трехпроцессная модель. Модель учитывает тепломассоперенос в зоне ММП с учетом изменения характеристик толщи за счет обводнения закачиваемыми рассолами, растворяющими льдистую составляющую разреза (создание техногенного водоносного горизонта в ММП), и миграции рассолов на участке. Проведенные расчеты с учетом тепломассопереноса показывают текущее заполнение участка с прогнозными рекомендациями дальнейшей эксплуатации участка.

Проведенные расчеты, а также новые подходы с учетом процессов тепломассопереноса и фазовых переходов вода—лед и лед—вода к применяемому в настоящее время моделированию процесса закачки дренажных вод позволяют более реалистично оценивать прогнозный потенциал эксплуатируемых участков закачки, а также могут выступать в качестве дополнительного элемента контроля процесса закачки и развития техногенного водоносного горизонта в толще ММП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П., Лукьянчикова Л.Г. Подземное захоронение промышленных сточных вод. М.: Недра, 1994. 282 с.
2. Дроздов А.В. Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2007. 296 с.
3. Дроздов А.В. Оценка перспективности участка “Левобережный” для захоронения дренажных рассолов трубки “Удачной” // Изв. Сиб. отд. Секции наук о Земле РАЕН. 2013. № 1(42). С. 146–156.
4. Дроздов А.В. Структурно-тектонические критерии оценки приемистости массивов для захоронения сточных вод алмазодобывающих предприятий в криолитозоне Западной Якутии // Криосфера Земли. 2006. Т. X. №2. С. 27–45.
5. Дроздов А.В., Готовцев С.П. Особенности миграции рассолов в криолитозоне при их подземном захоронении // Формирование подземных вод криолитозоны. Якутск: ИМЗ СО РАН, 1992. С. 31–48.
6. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
7. Егоров А.Г. Фильтрационные эффекты в задачах тепломассопереноса и деформирования насыщенных пористых сред: автореф. дис. ... д.ф.-м.н., специальность 01.02.05. Казань, 1999. 31 с.
8. Еришов Э.Д., Комаров И.А., Чувиллин Е.М. Прогноз процессов взаимодействия жидких техногенных рассолов, захороняемых в массиве мерзлых пород // Геоэкология. 1997. № 2. С. 19–29.
9. Костерина Е.А. Математическое моделирование и численное решение одномерных задач насыщено-ненасыщенной фильтрации: автореф. дис. ... к.ф.-м.н., специальность 05.13.18. Казань, 1999. 15 с.
10. Grenier C., Anbergen H., Bense V., Chanzy Q. et al. Groundwater flow and heat transport for systems undergoing freeze-thaw: Intercomparison of numerical simulators for 2D test cases // Advances in Water Resources. 2018. V. 114. P. 196–218.
11. McKenzie J.M., Voss C.I., Siegel D.I. Groundwater flow with energy transport and water—ice phase change: Numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs // Advances in Water Resources. V. 30. Is. 4. 2007. P. 966–983.
12. Mohammed, A.A., Bense, V.F., Kurylyk B.L. et al. Modeling reactive solute transport in permafrost-affected groundwater systems // Water Resources Research. 2021. 57(7), art. e2020WR028771. <https://doi.org/10.1029/2020WR028771>
13. Diersch, H.-J. G. FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. FEFLOW. 2014. 1018 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-38739-5>

DEVELOPMENT OF HEAT AND MASS TRANSFER MODULUS TO FEFLOW CODE FOR CALCULATION OF BRINE LOADED TO PERMAFROST GROUND

I. A. Rastorguev^{a,b,#}, I. V. Litvinova^{b,##}, N. A. Iost^b, A. V. Ilin^b

^a*Kurchatov Institute, pl. Kurchatova, 1, Moscow, 123098 Russia*

^b*AK "Alrosa", ul. Sovetskaya, 5, Novosibirsk, 630007 Russia*

[#]*E-mail: stiar@mail.ru*

^{##}*E-mail: LitvinovaIV@alrosa.ru*

The article discusses the application of FreezeThaw75 module, developed by one of the authors to calculate heat and mass transfer taking into account water–ice and ice–water–water phase transitions. Numerical simulations are compared with the analytical solution and other software codes. The module was tested at one of the injection sites in Daldino-Alakitskii district of Yakutia. FreezeThaw75 module was developed in relation to Feflow v7.4–7.5 model environment. The module was tested on a model of brine injection into frozen rocks. The model simultaneously takes into account the movement of groundwater flow, heat and mass transfer and phase transitions. A feature of the calculations in the developed model is the consideration of large injected volumes of highly mineralized brines. It influences the degradation of permafrost and takes into account the cryohydrogeological conditions of the site. Brines are injected into permafrost rocks with a high absorption capacity especially in areas confined to zones of tectonic disturbances. The developed module can adjust the predicted potential of the operated injection sites. It can also act as an additional element of control over the injection process and the formation of an artificial aquifer in the permafrost rocks.

Keywords: *heat and mass transfer, FreezeThaw75 module, phase transitions, Daldyno-Alakitskii district, groundwater flow model, permafrost, brines, hydraulic conductivity, effective porosity, Feflow*

REFERENCES

1. Gol'dberg, V.M., Skvortsov, N.P., Luk'yanchikova L.G. [Subsurface disposal of industrial sewage]. Moscow, Nedra Publ., 1994, 282 p. (in Russian)
2. Drozdov, A.V. Disposal of drainage brines to permafrost rocks (by the example of Siberian platform permafrost zone). Irkutsk, IGTU Publ., 2007, 296 p. (in Russian)
3. Drozdov A.V. [Assessment of the prospects of Levoberezhny site for the disposal of drainage brines from the Udachnaya pit]. *Izv. Sib. otd. Seksii nauk o Zemle RAEN*, 2013, no. 1 (42). pp. 146–156. (in Russian)
4. Drozdov A.V. [Structural tectonic criteria of assessing rock massif capacity for disposal of industrial sewage from diamond-mining enterprises in the Western Yakutiya cryolithozone]. *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. X, no. 2, pp. 27–45. (in Russian)
5. Drozdov A.V. Gotovtsev, S.P. [Specific features of brine migration in the permafrost zone upon their subsurface disposal]. In: [Formation of groundwater in the cryolithozone]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 1992, pp. 31–48. (in Russian)
6. Drozdov, A.V., Iost, N.A., Lobanov, V.V. [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia]. Irkutsk, Izd-vo IGTU, 2008. 507 p. (in Russian)
7. Egorov, A. G. [Filtration effects in the tasks of hat and mass transfer and deformation of saturated porous media]. Extended Abstract of Doctoral (Phys.-Math.) Dissertation, Kazan, 1999, 31 p. (in Russian)
8. Ershov, E.D., Komarov, I.A., Chuvilin, E.M. [Forecast of interaction processes between liquid technogenic brines disposed in frozen rock massifs]. *Geoekologiya*, 1997, vol. 2, pp. 19–29. (in Russian)
9. Kosterina, E.A. [Mathematical modeling and numerical solution of unidimensional tasks of saturated-unsaturated filtration]. Extended Abstract of Cand. Sci. (Phys.-Math.) Dissertation, Kazan, 1999, 15 p. (in Russian)
10. Grenier, C., Anbergen, H., Bense, V., Chanzy, Q. et al. Groundwater flow and heat transport for systems undergoing freeze-thaw: Intercomparison of numerical simulators for 2D test cases. *Advances in Water Resources*, 2018, vol. 114, pp. 196–218.
11. McKenzie, J.M., Voss, C.I., Siegel, D.I. Groundwater flow with energy transport and water–ice phase change: Numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs, *Advances in Water Resources*, 2007, vol. 30, issue. 4, pp. 966–983.
12. Mohammed, A.A., Bense, V.F., Kurylyk BL. et al. Modeling reactive solute transport in permafrost-affected groundwater systems, *Water Resources Research*, 2021, 57(7), art. e2020WR028771. <https://doi.org/10.1029/2020WR028771>
13. Diersch, H.-J.G. FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. FEFLOW, 2014, 1018 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-38739-5>