

Разработка распределенной математической модели и системы управления для снижения риска загрязнения водоносных систем минеральных вод

А.В. МАРТИРОСЯН ✉, **Ю.В. ИЛЬЮШИН** и **О.В. АФАНАСЬЕВА**
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
✉ martirosyan320@gmail.com

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Martirosyan, A.V.; Ilyushin, Y.V.; Afanaseva, O.V. Development of a Distributed Mathematical Model and Control System for Reducing Pollution Risk in Mineral Water Aquifer Systems. *Water* 2022, 14, 151. <https://doi.org/10.3390/w14020151>

Аннотация: Статья посвящена проблеме возрастающей необходимости автоматизации процесса эксплуатации месторождений минеральных вод. Внедрение систем управления и методов математического моделирования может существенно снизить риски нарушения структурной целостности месторождений и загрязнения водоносных горизонтов. Данное исследование особенно актуально для месторождений со сложными условиями залегания минеральных вод, так как недостаточная точность определения параметров режима работы месторождений может привести к тяжелым последствиям. В статье описана распределенная математическая модель, разработанная на основе уравнения геофильтрации. На основе этой модели представлен новый метод оценки взаимного влияния месторождений, добыча которых ведется из одного водоносного горизонта. Для более детального изучения влияния параметров режима работы на объект была разработана физическая модель пласта. Использование датчиков Arduino и разработанного программного обеспечения позволяет построить 3D-график входного воздействия и его отклика в различных точках объекта в виде распределения температуры. Результаты моделирования позволяют использовать предложенную модель для синтеза системы автоматического управления.

Ключевые слова: датчики; математическая модель; системный анализ; моделирование; управление; месторождение минеральной воды.

Development of a Distributed Mathematical Model and Control System for Reducing Pollution Risk in Mineral Water Aquifer Systems

Alexander V. MARTIROSYAN ✉, **Yury V. ILYUSHIN** and **Olga V. AFANASEVA**
Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia
✉ martirosyan320@gmail.com

Abstract: The article is devoted to the problem of the growing need of the mineral water fields' exploitation process automation. The implementation of control systems and mathematical modeling methods can significantly reduce the fields' structural integrity violation and pollution of aquifers risks. This research is especially relevant for the fields with difficult conditions of mineral waters occurrence, since the insufficient accuracy of determining the fields' operating mode parameters can lead to a severe incident. The article describes a distributed mathematical model developed from the geo-filtration equation. Based on this model, a new method for assessing the mutual influence of the fields, the production of which is carried out from one aquifer, is presented. For a more detailed study of the operating mode parameters influence on the object a physical model of the reservoir was developed. The using of Arduino sensors and the developed software allows us to construct a 3D graph of the input action and its response at the different points of the object as temperature distribution. The simulation results make it possible to use the proposed model for the automatic control system synthesis.

Keywords: mineral water field; mathematical model; system analysis; modeling; control; sensors.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

1. Введение

В настоящее время добыча полезных ископаемых имеет значение не только для благосостояния Российской Федерации [1], но и играет важную роль в мировой экономике [2, 3]. Одним из основных видов извлекаемого сырья является сырье с реологическими свойствами. К таким видам сырья относятся нефть, водные ресурсы и т.д. [4]. Большинство месторождений минеральных вод имеет сложные условия для возникновения флюидов в пласте. Добыча из таких месторождений осложняется огромным количеством факторов, влияющих на состояние пласта [5, 6]. В рамках данного исследования в качестве тест-объекта были выбраны месторождения региона Кавказских минеральных вод (КМВ), где добываются большие объемы минеральных вод с уникальным химическим составом. Химический состав наиболее важных для сохранения минеральных вод региона КМВ приведен в таблице 1. Под влиянием постоянной интенсивной эксплуатации состояние гидроролитосферы этого региона ухудшается. Помимо процесса эксплуатации, на общее состояние месторождений влияют такие природные и техногенные факторы, как: высокий износ городской канализации, коммунальной и инженерной инфраструктуры, обширный автопарк, хаотичная застройка и т.д. Совокупность представленных факторов постепенно изменяет условия залегания грунтовых вод [7]. Это приводит к возникновению локальных чрезвычайных ситуаций, в результате чего происходит их постепенное загрязнение. Гидроминеральные ресурсы являются важной составляющей развития региона, а некоторые виды минеральных вод обладают уникальным химическим составом, не имеющим аналогов в мире [3].

Все вышеперечисленное определяет необходимость совершенствования методов мониторинга работы месторождений, поскольку серьезная авария на каждом из них может стать экономической и экологической катастрофой для региона. В качестве возможного решения проблемы предлагается использование методов математического моделирования и организация автоматического управления процессом добычи минеральной воды [8].

Таблица 1

Химический состав минеральных вод региона КМВ

Название воды	Минерализация г/дм ³	Основной ионный состав						Биоактивные вещества
		Анионы, мг/дм ³			Катионы, мг/дм ³			
		HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	(Na ⁺ + K ⁺)	
Нарзан	2,0-3,5	1000-1700	250-500	50-200	200-500	50-150	50-250	CO ₂ 1000-2500
Доломитовый нарзан	4,0-4,5	2000-2300	600-800	250-350	650-700	100-180	300-400	CO ₂ 2000-2300
Сульфатированный нарзан	5,0-5,5	2300-2500	1400-1600	<50	700-800	200-400	200-300	CO ₂ 2000-3000
Эссентуки 4	7,0-10,0	3400-4800	<25	1300-2000	<150	<100	2000-3000	H ₃ BO ₃ 30-60, CO ₂ 500-1800
Эссентуки 17	10,0-14,0	5000-7200	<150	1200-2200	<150	<150	2700-3900	H ₃ BO ₃ 30-80, CO ₂ 500-1200

2. Постановка задачи

Существующие системы автоматизации управления технологическими процессами эксплуатации скважин базируются на типовых гидрогеологических моделях [9, 10]. Чаще всего используются два типа моделей: гидродинамические и гидравлические [11, 12]. Предлагаемое решение не имеет аналогов на отечественном рынке по следующим параметрам:

- 1) возможность учета пространственного распределения объекта (месторождения);
- 2) моделирование комплекса взаимосвязанных гидрогеологических объектов;
- 3) возможность управления параметрами режима работы группы гидрогеологических объектов.

Разрабатываются математические модели, внедряются системы автоматического управления (САУ), которые позволяют обеспечить требуемое качество технологического процесса (ТП) [13, 14].

Математическое моделирование является одним из относительно универсальных способов визуализации происходящего в пласте до его разработки, т.е. в покое или в начальном состоянии, а также в процессе его эксплуатации. Задача математического моделирования месторождения - визуализировать все процессы, а поскольку самым простым способом восприятия информации для человека является визуальное восприятие, следовательно, математическая модель пласта способна частично упростить работу человека с разработкой и эксплуатацией месторождения [5]. Абсолютно адекватным является тот факт, что построить универсальную математическую модель пласта невозможно, так как каждое месторождение уникально. Однако можно построить математическую модель, которая будет адаптивной и способной к эволюции [15, 16].

Адаптивную модель выгодно использовать при разработке любого пласта. Меняются некоторые параметры, и математическая модель становится понятной и адекватной для нового месторождения.

Пространственно-распределенная математическая модель является более наглядной, так как такие модели отражают изменение определенного параметра не только в зависимости от его расположения в пространстве, но и отражают его изменение во времени [17, 18].

Модель объекта выступает в качестве математического обеспечения автоматизированной системы управления. Алгоритм взаимодействия системы управления и объекта управления приведен на рисунке 1.

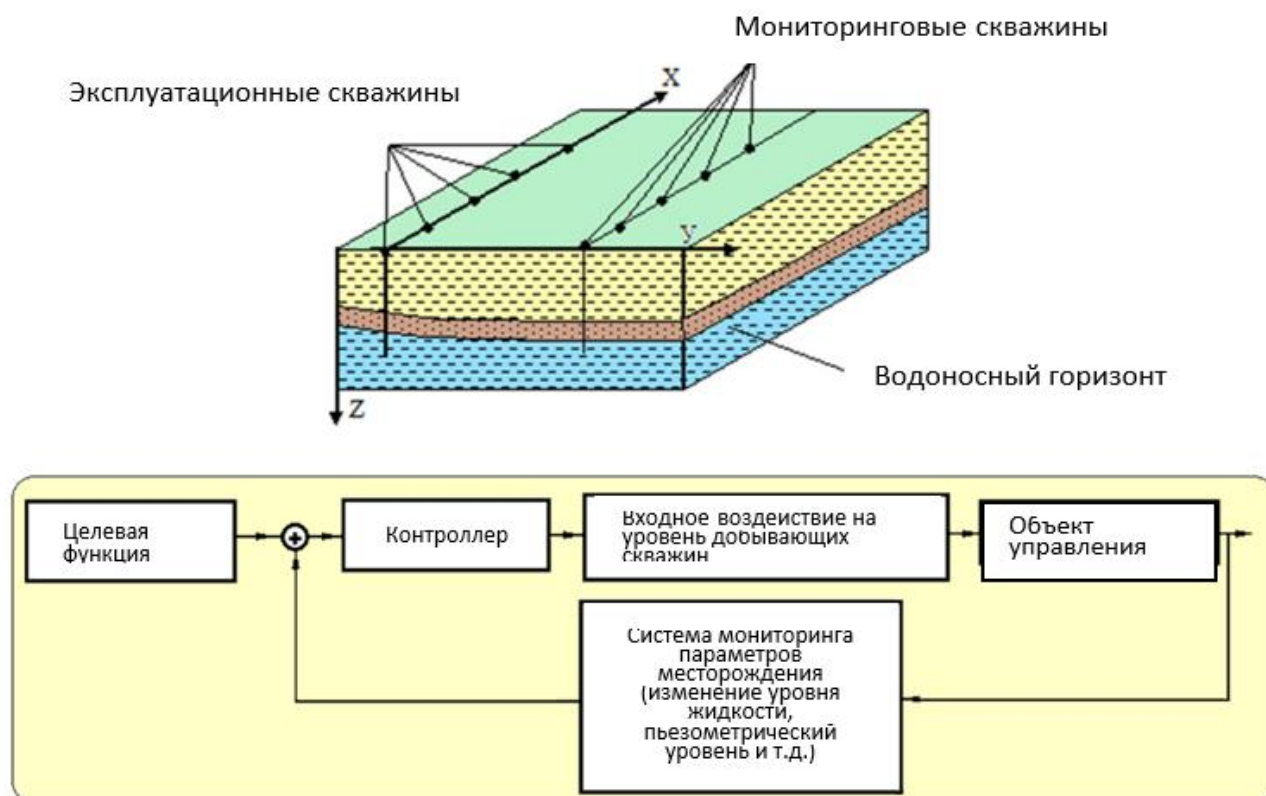


Рис. 1. Концептуальная модель процесса управления месторождением минеральных вод

Сначала с помощью информации о тестировании притока подземных вод и результатов математического моделирования определяется заданное значение понижения уровня жидкости в мониторинговых скважинах. Затем, используя полученные данные, контроллер рассчитывает значение входного воздействия. После того как объект управления отреагирует на входное воздействие, датчики могут просканировать основные гидродинамические параметры, а полученные данные поступают в контур обратной связи-управления, где заданное значение сравнивается с полученным, и замкнутая цепочка повторяется.

3. Методы

3.1. Описание метода

Анализ современных исследований позволил определить набор эффективных методов моделирования гидрогеологических объектов, которые наиболее часто используются для решения задач в данной предметной области [3,5]. В результате анализа эффективности представленных методов для дальнейшего исследования был выбран метод математического описания гидрогеологического объекта в виде трехмерной геофильтрационной модели. Эксперимент, проведенный на прототипе модели гидрогеологического объекта, показал допустимые значения сходимости реальных данных с модельными. Соответственно, разработанная модель может адекватно отражать характер и интенсивность гидродинамических процессов месторождения и может быть использована для дальнейших исследований [18]. Предложенная методика позволяет обеспечить достаточную степень сходимости модели и реальных данных в процессе моделирования гидрогеологических процессов на месторождении минеральных вод. Методика применима к месторождениям минеральных вод I, II, III и IV групп структурной сложности.

Согласно Руководству по согласованию российских стандартов отчетности по полезным ископаемым и международным стандартам отчетности Комитета по минеральным запасам (CRIRSCO), сложности геологического строения месторождения подразделяются на следующие группы:

1. Первая группа. Месторождения с простым геологическим строением, содержащие крупные или средние тела полезных ископаемых, которые характеризуются стабильной толщиной и внутренним строением, постоянным качеством минерального сырья и равномерным распределением основных ценных компонентов.

2. Вторая группа. Месторождения со сложным геологическим строением, содержащие крупные и средние тела с нарушенным залеганием, которые могут характеризоваться неустойчивой толщиной и неравномерным распределением основных ценных компонентов.

3. Третья группа. Месторождения с очень сложным геологическим строением, содержащие средние и мелкие тела полезных ископаемых с интенсивно нарушенным залеганием, которые могут характеризоваться очень изменчивой толщиной и внутренним строением, а также очень неравномерным распределением основных ценных компонентов.

4. Четвертая группа. Месторождения с небольшими, реже средними по размерам телами полезных ископаемых с крайне нарушенным залеганием, которые могут характеризоваться резкой изменчивостью толщины и внутреннего строения, крайне неравномерным качеством полезного ископаемого [18].

Все гидрогеологические расчеты основаны на использовании дифференциальных уравнений математической физики, в том числе и расчеты параметров водопроницаемости. Значения этих параметров основываются на данных откачек из скважин и могут обеспечить стабильность природной среды и схематизацию фильтрационных процессов [19].

Схематизация осуществляется в зависимости от ряда природных факторов: гидродинамического режима пласта, характера его строения и граничных условий в разрезе и плане. Кроме того, в расчетной схеме необходимо учитывать характер вскрытия водоносного горизонта скважинами [20].

По гидродинамическому режиму водоносные горизонты делятся на два основных типа: напорные и безнапорные.

Для модельного эксперимента, предлагаемого в данной работе, используются следующие инструменты:

- 1) программный пакет Delphi 7;
- 2) программный комплекс для моделирования гидродинамических процессов, разработанный в соответствии с ГОСТ Р 57,700.2;
- 3) программный комплекс для моделирования параметров разомкнутой системы управления, разработанный по ГОСТ 24.104-85;
- 4) программный комплекс для моделирования параметров замкнутой системы управления, разработанный по ГОСТ 24.104-85;
- 5) программный комплекс для моделирования пространственной неоднородности гидрогеологического строения пластов месторождения, разработанный по ГОСТ Р 57 700.2 [21].

Математическая модель объекта описывает характер течения гидродинамических процессов на месторождении. Результатом входного воздействия является распределение изменения уровня жидкости в моделируемом пласте [22]. Модель можно считать устойчивой, если в процессе имитации система выходит на устойчивое состояние за время, коррелирующее с реальным, и уровень устойчивого состояния не меняется в течение всего расчета. Успешное пилотное моделирование подтверждает устойчивость модели и вычислительной схемы [23].

После подтверждения устойчивости модели с помощью данных, полученных в ходе опытно-фильтрационных работ, математическая модель дополняется данными о тектонических изменениях или нарушениях в пластах-коллекторах [24]. Для отражения структурных изменений и нарушений в пластах коэффициент перетока b определяется по пространственному распределению в пласте (в каждой точке отбора).

Коэффициент перетока рассчитывается по формуле (уравнение (1)):

$$b = \sqrt{\frac{T \cdot m}{k}}, \quad (1)$$

где T – некоторое среднее значение проницаемости водоносных горизонтов, m – толщина низкопроницаемых слоев, k – коэффициент фильтрации.

Основным критерием качества результатов моделирования является соответствие между моделью и ретроспективными данными о снижении уровня жидкости в пласте при заданном объеме добычи [25]. В случае, когда точность моделирования составляет 70-85 % (в зависимости от сложности объекта и задачи), можно утверждать о надежности разработанной математической модели [26, 27].

Для повышения низкой точности моделирования необходимо учитывать следующие факторы, которые могут вызвать изменение напора (уровня) подземных вод:

- 1) гидрогеологические условия (литологическое строение водоносных грунтов, характеристики питания и условия на границах исследуемого слоя);
- 2) режим подземных вод (особенности характера колебаний напора-уровня и влияние на эти колебания различных возмущающих источников, в том числе техногенных);
- 3) технологические условия проведения испытаний, данные которых используются для проверки точности моделирования (колебания дебита и давления при откачке) [28].

Учет этих факторов дает возможность скорректировать расчетную схему и добиться более высокой точности моделирования для будущего синтеза системы управления [29].

В процессе разработки математической модели объекта реальной природы исследователи часто сталкиваются с проблемой нехватки данных. Не всегда удается получить полный отчет о результатах тестирования притока подземных вод. Для месторождений минеральных вод со сложными условиями их залегания получить эти данные невозможно, так как в этом случае месторождения могут быть исследованы только на участке эксплуатации. Даже когда исследователи располагают минимально необходимым объемом информации, становится проблемой обеспечить приемлемый уровень адекватности модели. Для решения этой проблемы предлагается экспериментальная установка, которая может имитировать участок месторождения минеральной воды. Использование различных типов датчиков и агентов дает возможность моделировать большое количество различных входных воздействий и исследовать реакции объекта. В данной работе приведен прототип предлагаемой установки, которая может имитировать перепад давления в пласте в процессе эксплуатации.

3.2. Разработка макета «пласта»

Для исследования была создана «пластовая» модель пласта. В контейнер кубической формы со стороной 14 см были послойно помещены песок с окаменелостями (мелкими камнями), слой известняка, минеральная вода и глина.

На первом этапе разработки необходимо определиться с датчиками, которые будут использоваться. Поскольку измеряемым параметром пласта в исследовании является температура, был выбран цифровой датчик температуры DS18B20, отвечающий всем требованиям. Этот датчик является полноценным термометром, способным измерять температуру в диапазоне от -55 °C до $+125$ °C. Каждому датчику присвоен свой уникальный 64-битный адрес, что позволяет обеспечить точное определение значения температуры из нужной точки пласта. Датчик DS18B20 работает с точностью $\pm 0,5$ °C. Подход к подключению датчиков позволяет подключать целую группу датчиков (до 264) к одной линии.

В исследовании используется девять датчиков температуры DS18B20. На рисунке 2 показана схема подключения девяти датчиков в собранном виде, что позволяет легко перемещать датчики в пространстве независимо от печатной платы.

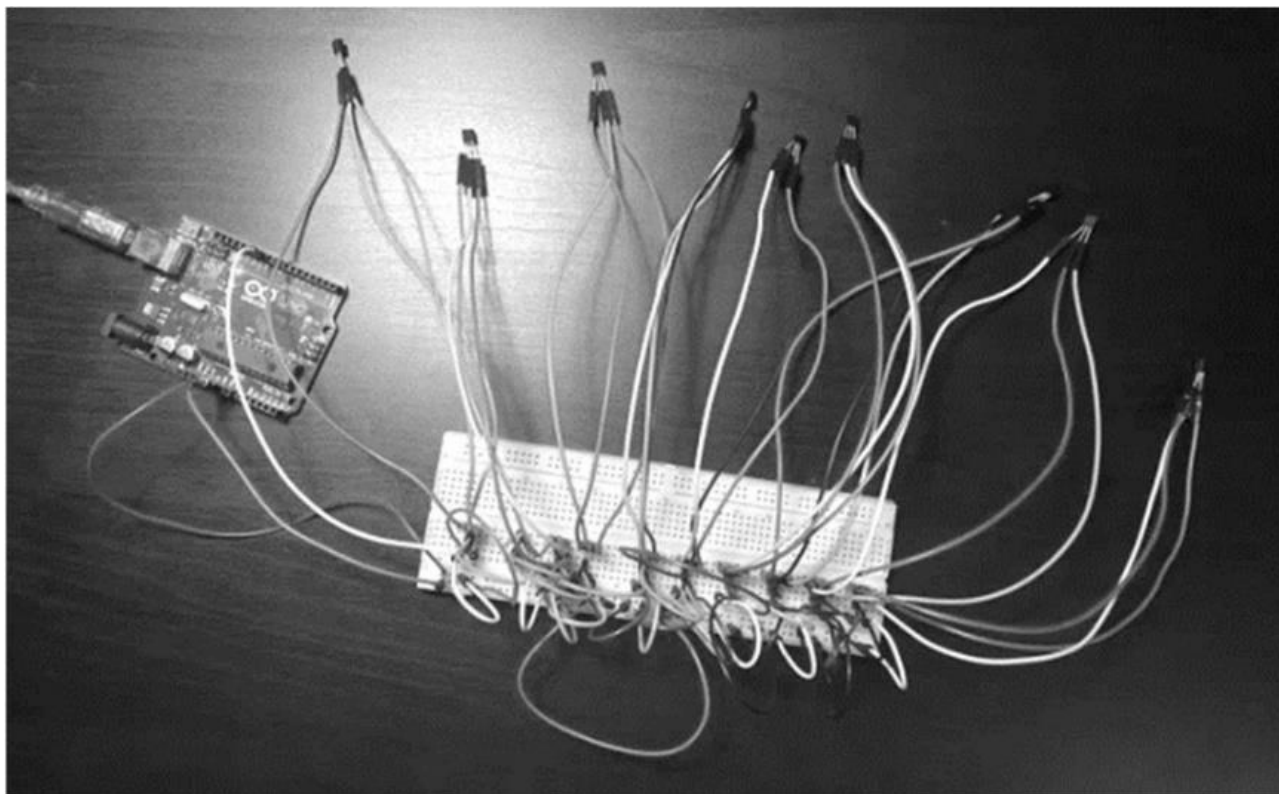


Рис. 2. Устройство с датчиками DS18B20

После физического подключения датчиков и работы с ними необходимо использовать программное обеспечение Arduino IDE (версия 1.8.6), а также библиотеки OneWire и Dallas Temperature. В качестве языка и среды программирования были выбраны Delphi и Embarcadero RAD Studio. Далее необходимо разработать алгоритм получения информации о температуре из скетча. Однако прежде чем определить температуру, какой датчик покажет соответствующее значение, т.е. необходимо определить адрес каждого датчика и его расположение в схеме, чтобы информация о температуре каждой точки была получена корректно.

Следующим этапом стала разработка программного модуля, который записывает данные о температуре и ее изменениях в базу данных (БД) и строит пространственно-распределенную математическую модель в виде 3D-графа. Это позволяет анализировать происходящее в терминах значений, рассматривать изменения, произошедшие за определенный период времени. В общем случае в базе данных будет храниться время измерения и температура (в °C) в девяти точках объекта в каждый момент времени. Тип данных температуры – числовой (размер поля – двойной с плавающей точкой), так как для того, чтобы наблюдать за изменением температуры, достаточно точности в два знака после запятой.

Кроме того, каждое значение температуры классифицируется как T_{xy} , чтобы точно знать, где находится та или иная точка на слое (x отвечает за расположение точки по координате x , y , соответственно, по координате y). Координата z остается без внимания, так как предлагается только один пласт пласта. Учета одного пласта достаточно для созданного макета. В дальнейшем для улучшения модели можно добавить дополнительные датчики и слои.

Кроме того, была разработана база данных, в которой можно хранить данные о времени измерений и значениях температуры в заданных точках. Необходимо было разработать программный модуль, позволяющий получать информацию с датчиков, поступающую через COM-порт, обрабатывать ее, записывать показания в базу данных и строить в реальном времени 3D-график значений

температуры в точках пласта. Окончательная версия программы состоит из следующих компонентов системы:

1. DBGrid (для отображения таблицы «температура»);
2. DBNavigator (для управления записями таблицы);
3. ADOConnection (для связи с базой данных);
4. ADOQuery;
5. ComPortDriver;
6. Таймер;
7. Источник данных.

Непосредственная обработка занимает время, и возникает необходимость убедиться, что не произойдет сбоев из-за несовпадения времени. Для этого можно добавить компонент таймера, который будет отвечать за заполнение таблицы «температура».

Для предотвращения возможных ошибок смещения времени в процессе уравнивания был добавлен компонент Timer. Компонент Timer будет управлять процессом заполнения таблицы «температура», а дополнительное условие Edit будет контролировать точность заполнения данных. Процедура заполняет таблицу «температура» данными, которые передаются с датчиков через коммуникационный (COM) порт. Прямой связи с базой данных не было, поэтому эта связь была прописана в коде программы. В результате работы данного алгоритма получаются значения для 3D-диаграммы трендов распространения температуры.

4. Разработка распределенной математической модели экспериментального водохранилища

Предполагалось, что водохранилище представляет собой идеальный трехмерный объект, вид которого показан на рисунке 3.

L_x , L_y , L_z – геометрические параметры объекта; S1, S2, S3, S4, S5, S6 – идентификаторы лиц.

Начальные условия: $L_x = 0,06$ м., $L_y = 0,06$ м., $L_z = 0,06$ м. Можно предположить, что температура на контуре питания остается постоянной, т.е. граничные условия со всех сторон являются граничными условиями первого рода и обозначаются как «0», а интервал времени (шаг по времени) $dt = 1$ с. Исходные данные представлены в таблице 2.

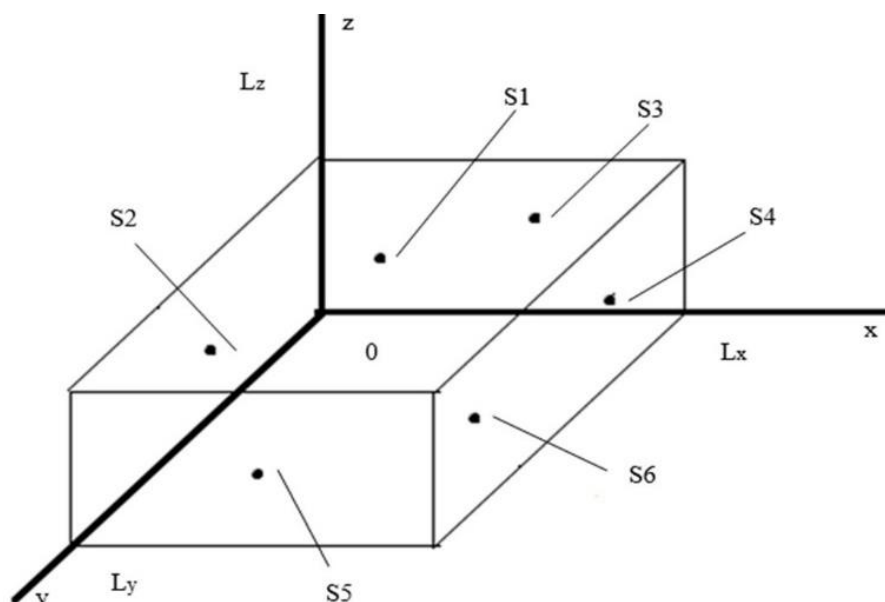


Рис. 3. Модель водохранилища

Таблица 2

Параметры моделирования

LX, м	LY, м	LZ, м	∂ , т.с.	S1	S2	S3	S4	S5	S6
0,03	0,03	0,01	1	0	0	0	0	0	0

К основной группе параметров, позволяющих оценить состояние месторождения в данный момент времени, а также спрогнозировать его состояние через определенный промежуток времени, относятся температура, давление, проницаемость, коллекторские свойства пород и др. Температура, давление и коэффициент фильтрации являются основными параметрами движения флюидов в пласте. При изменении температуры происходит изменение давления, и, соответственно, изменяется движение жидкости в пласте и скважине [30]. В данном исследовании параметром, используемым для 3D-моделирования, является температура.

Выбор предлагаемого метода обусловлен следующими факторами:

1. Предлагаемый метод учитывает межпластовые взаимодействия водоносного горизонта.
2. Предлагаемый метод дает возможность трехмерной модели математического описания месторождения.
3. Предлагаемый метод обеспечивает достаточно высокую точность отражения гидродинамических процессов для данного эксперимента.
4. Предлагаемый метод был успешно опробован на одном из месторождений рассматриваемого региона [3].

Математическая модель пласта как распределенного объекта представлена следующими уравнениями [2]:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right);$$

$$0 < x < L_x; 0 < y < L_y; 0 < z < L_z; t > 0, \quad (2)$$

где a – теплопроводность, ∂t – частота дискретизации по времени, ∂x , ∂y , ∂z – шаг дискретизации по координатам x , y и z соответственно, t – время, τ – шаг по времени, $T(x, y, z, t)$ – температура в каждой точке тела в момент времени t .

Граничные условия, при которых должно решаться уравнение (2), можно записать в виде соотношений плоскостей граней P :

$$\begin{cases} S1 : P(x, y, L_z) = 0; 0 < x < L_x; 0 < y < L_y; t > 0 \\ S2 : P(0, y, z) = 0; 0 < x < L_x; 0 < y < L_y; t > 0 \\ S3 : P(x, 0, z) = 0; 0 < x < L_x; 0 < y < L_y; t > 0 \\ S4 : P(L_x, y, z) = 0; 0 < x < L_x; 0 < y < L_y; t > 0 \\ S5 : P(x, L_y, z) = 0; 0 < x < L_x; 0 < y < L_y; t > 0 \\ S6 : P(x, y, 0) = 0; 0 < x < L_x; 0 < y < L_y; t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Это один из вариантов представления пространственно-распределенной математической модели водоема. В уравнении (2) осталось найти a – коэффициент температуропроводности. Уравнение (2) может быть решено методом конечных разностей [3]. Преобразованное уравнение можно представить следующим образом:

$$\frac{T_{i,j,k,l} - T_{i,j,k,l-1}}{\Delta t} = a \left(\frac{T_{i-1,j,k,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i+1,j,k,l-1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j-1,k,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i,j,k+1,l-1}}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j,k,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i,j,k,l+1,l-1}}{\Delta z^2} \right). \quad (4)$$

Одним из вариантов подключения датчиков является расчет коэффициентов. Коэффициент a может быть выражен из уравнения (4) следующим образом:

$$a = \left(\frac{T_{i,j,k,l} - T_{i,j,k,l-1}}{\Delta t} \right) / \left(\frac{T_{i-1,j,k,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i+1,j,k,l-1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j-1,k,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i,j,k+1,l-1}}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j,k,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i,j,k,l+1,l-1}}{\Delta z^2} \right).$$

$$1 < i < N_x = 3; 1 < j < N_y = 3; 1 < k < N_z = 3; t > 1, \quad (5)$$

где i – номер точки выборки по x , j – номер точки выборки по y , k – номер точки выборки по z , l – номер точки выборки во времени, Δt – частота выборки во времени, Δx – шаг выборки по x , Δy – шаг выборки по y , Δz – шаг выборки по z , N_x , N_y , N_z – количество точек выборки по x , y и z , соответственно.

Пусть n – количество точек выборки в x , m – количество точек выборки в y , r – количество точек выборки в z , тогда

$$\Delta x = \frac{L_x}{n} = \frac{0.03}{3} = 0.01; \Delta y = \frac{L_y}{n} = \frac{0.03}{3} = 0.01; \Delta z = \frac{L_z}{n} = \frac{0.01}{3} = 0.003. \quad (6)$$

Таким образом, можно провести математическое моделирование объекта сложной формы, а теперь можно провести экспериментальное исследование.

5. Результаты

5.1. Анализ эффективности метода

Разработанная программа может достоверно отражать динамику и характер гидрогеологических процессов, происходящих на месторождении [31]. На рисунке 4 показан отклик системы на заданное снижение уровня пластовой жидкости в зоне добывающих скважин.

Для заданного значения входного воздействия, равного снижению уровня жидкости на 2 м, полученное в ходе моделирования значение составляет 1,92 м, что подтверждает адекватность разработанной модели. Приведенные результаты точности доказывают эффективность предложенного метода и дают возможность использовать данную модель для взаимосвязанных объектов.

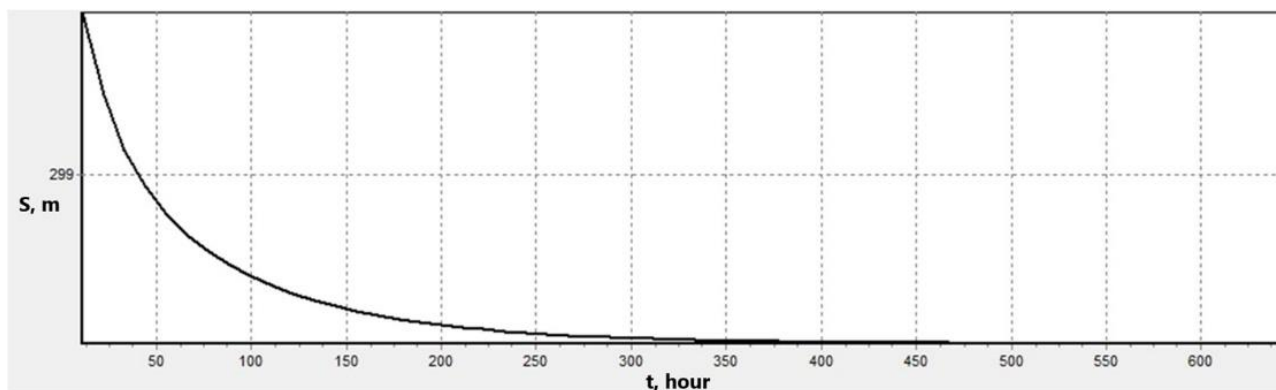


Рис. 4. График понижения уровня жидкости в пласте, м

В классическом методе геофильтрационного моделирования месторождение описывается как единый объект, внешнее воздействие на который задается граничными условиями, а также входными и управляющими воздействиями. Эта концепция не подразумевает включения в модель еще одного объекта (системы уравнений). С другой стороны, данный метод представляет объект как совокупность скважин, расположенных в прямоугольной фигуре конечной размерности. Такой уровень абстракции позволяет представить второй объект как удаленную группу скважин. В качестве исходных данных модели используются реальные геометрические параметры объекта. Влияние другого гидрогеологического объекта может быть представлено как входное воздействие, приложенное не к одной из групп скважин на месторождении, а к скважине, расположенной на расстоянии. Таким образом, можно проследить динамику изменения уровня жидкости в пласте, представляя два объекта как две (или более) скважины. Для лучшего соответствия модельного объекта реальному можно изменять параметры модели в точках отбора проб между рассматриваемыми скважинами, что будет отражать геологические и гидродинамические различия объектов.

Для проверки предложенного подхода была усовершенствована существующая модель. В модель были введены удаленные скважины для моделирования объекта, расположенного на том же водоносном горизонте. Реакция объекта на заданное входное воздействие (понижение уровня на 2 м) показана на рисунке 5.

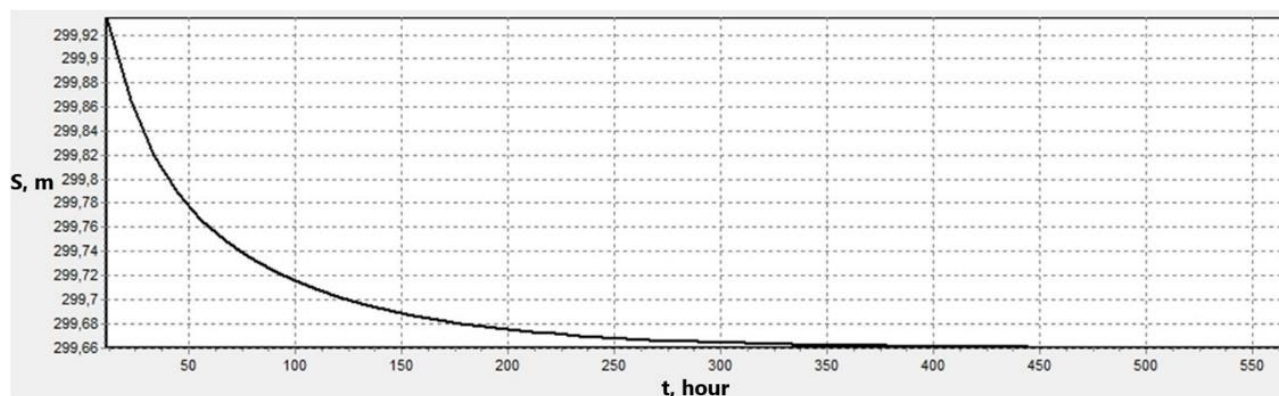


Рис. 5. График понижения уровня жидкости в резервуаре связанного объекта, м

В модельном примере взаимосвязанный объект расположен на расстоянии 15 км от точки входа. Результирующее падение уровня составляет 0,34 м или 17 % от целевого ввода, что является значительным изменением. Последующие эксперименты позволили выявить следующие закономерности взаимовлияния гидрогеологических объектов. При добыче в предельно допустимых объемах заметное влияние ($>5\%$) на уровень жидкости в пласте наблюдается на расстоянии от 5 до 15 км. На расстоянии от 25 до 60 км взаимное влияние добычи на уровень жидкости в пласте месторождения, расположенного ниже по течению, составляет 1-3 %. При среднем уровне добычи такой величины изменения уровня жидкости в пласте можно пренебречь, но в случае высокой интенсивности именно это незначительное изменение уровня может оказать пагубное влияние на состояние месторождения минеральных вод.

5.2. Результаты синтеза системы управления

При разработке системы управления необходимо учитывать взаимодействие и изменение температурного поля [32, 33]. Только при детальном расчете интенсивности взаимного влияния и учете результатов, полученных при определении допустимых объемов добычи, можно гарантировать стабильность процесса эксплуатации и структурную целостность месторождений [34, 35]. В качестве эксперимента полученные данные о взаимном влиянии скважин были использованы для корректировки исходных данных системы управления [36, 37]. Результат работы синтезированной системы управления представлен на рисунке 6.

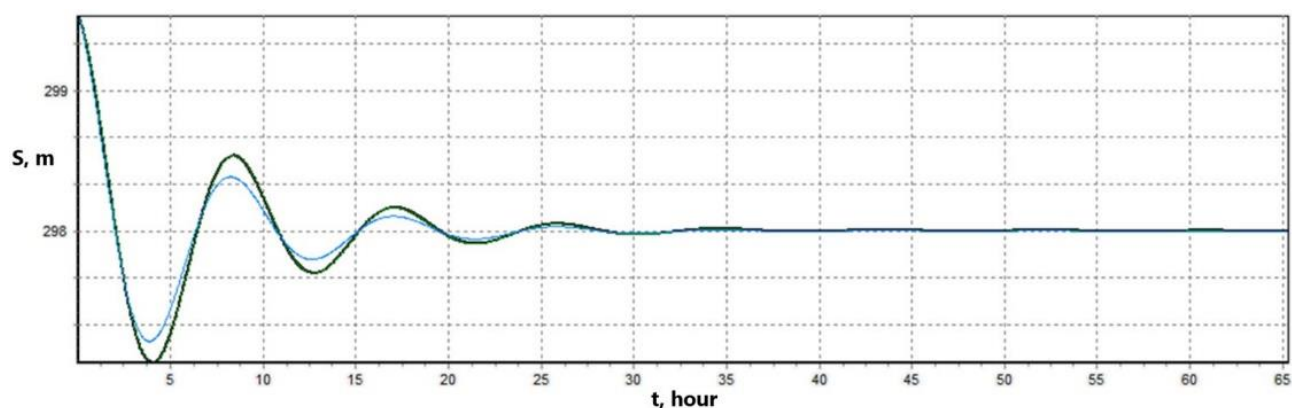


Рис. 6. Результат функционирования системы управления при заданных значениях

По результатам эксперимента можно утверждать, что использование данного класса систем для решения задачи автоматизации эксплуатации гидрогеологических объектов является эффективным. Внедрение систем управления на предприятиях, ведущих добычу из одного и того же водоносного горизонта на разных месторождениях (Кисловодское/Нагутское и др.), является необходимостью. Сложные условия залегания и ухудшающееся состояние месторождений (проседание верхних противодиффузионных слоев, образование трещин, риск загрязнения сточными водами

и т.д.) обуславливают необходимость постоянной корректировки параметров для поддержания стабильного режима работы. Таким образом, даже при незначительном изменении гидродинамических характеристик может возникнуть ошибка, и установленные объемы добычи станут чрезмерными, что неизбежно приведет к аварии.

5.3. Анализ результатов экспериментальной распределенной математической модели водохранилища

Основной задачей разработки программного модуля было построение пространственно-распределенной математической модели пласта в виде 3D-графа. Изображение 3D-графа было получено с помощью компонента Plot3D, который является бесплатным и находится в свободном доступе.

Результат моделирования пространственно-распределенной математической модели пласта сложной формы представлен на рисунке 7. Изменения температуры пласта не происходит до начала разработки этого пласта. Это видно из таблицы значений в окне и таблицы значений температуры пласта (показаний датчиков).

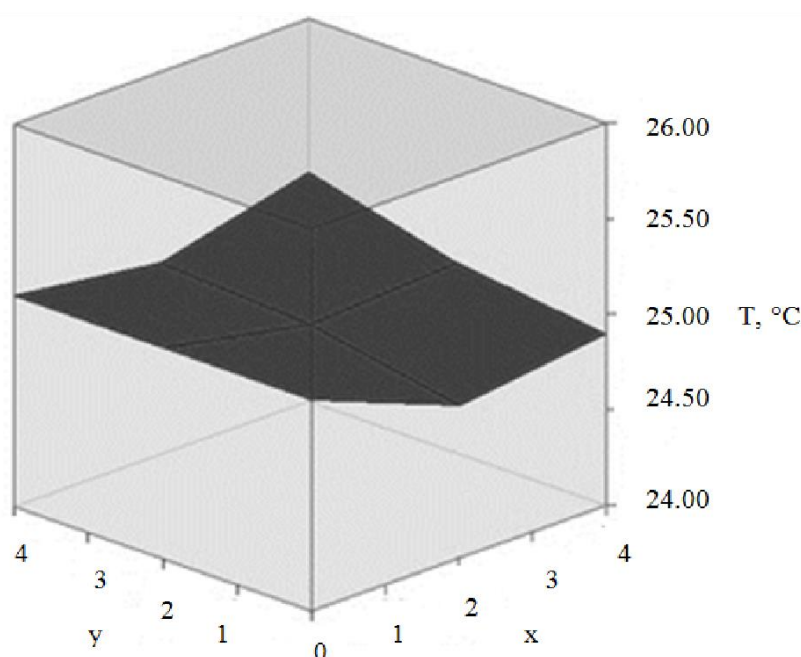


Рис. 7. График распределения температуры пласта в определенный момент времени

Разработанная модель отвечает заданному ряду требований, таких как адекватность, наглядность, адаптивность и способность к эволюции.

Математическая модель адекватна, так как построена в соответствии со значениями датчиков, измеряющих температуру в точках реальной модели. Она наглядна, так как все происходящие изменения отображаются таким образом, что человек видит эти изменения и может провести анализ на их основе. Модель является адаптивной. Эта модель, а точнее программный модуль, который выводит эту модель, может быть использован не только в рамках данного макета. Разработанная программа, которая строит 3D-графику, способна эволюционировать, а соответственно, и модель. В данном случае рассматривалась возможность применения конфигурации с девятью подключенными датчиками, которые расположены в пределах одного слоя.

6. Выводы

В настоящее время количество месторождений, находящихся на стадии снижения добычи, увеличивается. В связи с этим встает вопрос о необходимости перевода месторождений на стадию падающей добычи, а также об увеличении выработки на существующих месторождениях. Внедрение систем управления на предприятиях, добывающих из одного водоносного горизонта

на разных месторождениях, является необходимостью. Представленный метод моделирования взаимовлияния месторождений минеральных вод, добываемых из одного водоносного горизонта, способен повысить точность отражения гидродинамических процессов, что позволит достичь более стабильного и безопасного режима работы. Сложные условия залегания и ухудшающееся состояние месторождений (проседание верхних противодиффузионных слоев, образование трещин, риск загрязнения сточными водами и т.д.) вынуждают прибегать к постоянной корректировке параметров для поддержания стабильного режима работы. Последствия изменений (проникновение бытовых и техногенных загрязнений в эксплуатируемые пласты, разрушение пластов месторождения), к которым может привести неправильный режим работы, необратимы.

Использование и совершенствование предложенной экспериментальной установки способно получить инновационный успех в научных исследованиях в области моделирования подземных вод. На начальном этапе разработанная модель способна отразить структуру пластового сегмента месторождения. Даже на начальном этапе исследований реакция модельного объекта близка к реальному. Совершенствование данной модели за счет использования различных пород, минералов позволяет имитировать неоднородность водоносных и водонепроницаемых пластов. Для имитации давления в пласте может быть использована камера давления, что позволит обеспечить более детальное изучение гидродинамических процессов. Полученные в результате экспериментов данные и закономерности могут повысить уровень знаний о методах моделирования месторождений минеральных вод.

Практические результаты могут быть применены для решения задач автоматизации процессов управления сложными объектами с распределенными параметрами. На основе теоретических исследований разработка практической методики позволит анализировать системы управления применительно к группе природных объектов со сложной пространственной структурой и будет использована на предприятиях по производству минеральной воды (АО (ЗАО) «Нарзан» и др.). Результаты исследования также могут быть применены в нефтегазовой отрасли при условии моделирования нефтегазовых месторождений на основе предложенных методов.

На данный момент определены три направления дальнейших исследований:

1. Применение методов анализа чувствительности для оценки влияния изменения исходных параметров модели на выходные характеристики.
2. Адаптация и масштабирование разработанных методов моделирования для решения задач нефтегазовой отрасли.

Вклад авторов: концептуализация, Ю.В.И. и А.В.М.; методология, А.В.М.; программное обеспечение, Ю.В.И.; валидация, О.В.А.; формальный анализ, Ю.В.И.; исследование, О.В.А.; ресурсы, Ю.В.И.; курация данных, О.В.А.; написание – подготовка первоначального проекта, А.В.М.; написание –рецензирование и редактирование, Ю.В.И., А.В.М. и О.В.А.; визуализация, О.В.А.; руководство, О.В.А.; администрирование проекта, А.В.М.; получение финансирования, Y.V.I. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: исследование выполнено за счет средств субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 г. № ФСРВ-2020-001 (Разработка и системный анализ систем управления параметрами эксплуатации месторождения минеральных вод). Исследование выполнено в Санкт-Петербургском горном университете.

Заявление о доступности данных: не применимо.

Конфликты интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Resniova, E.; Ponomarenko, T. Sustainable Development of the Energy Sector in a Country Deficient in Mineral Resources: The case of the Republic of Moldova. *Sustainability* 2021, 13, 3261. <http://doi.org/10.3390/su13063261>
2. Ponomarenko, T.; Nevskaya, M.; Jonek-Kowalska, I. Mineral Resource Depletion Assessment: Alternatives, problems, results. *Sustainability* 2021, 13, 862. <http://doi.org/10.3390/su13020862>
3. Pershin, I.M.; Malkov, A.V.; Pomelyayko, I.S. Design of a distributed debit management network of operating wells of fields of the CMW region. In Proceedings of the 3rd International Conference on Futuristic Trends in Network and Communication Technologies, Taganrog, Russia, 14-16 October 2020; pp. 317-328.
4. Vasilev, Y.; Cherepovitsyn, A.; Tsvetkova, A.; Komendantova, N. Promoting Public Awareness of Carbon Capture and Storage Technologies in the Russian Federation: A system of educational activities. *Energies* 2021, 14, 1408. <http://doi.org/10.3390/en14051408>

5. Pershin, I.M.; Kukharova, T.V.; Tsapleva, V.V. Designing of Distributed Systems of Hydrolithosphere Processes Parameters Control for the Efficient Extraction of Hydromineral Raw Materials. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 1728, 012017. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1728/1/012017>
6. Pomelyaiko, I.S.; Malkov, A.V. Quality Problems of Surface Water and Groundwater at the Health Resorts in the Regions of Caucasian Mineral Waters and Ways to Their Solution. *Water Resour.* 2019, 46, 214-225. <http://doi.org/10.1134/S009780781902012X>
7. Hirsch, R.M.; Slack, J.R.; Smith, R.A. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. *Water Resour. Res.* 1982, 18, 107–121. <http://doi.org/10.1029/WR018i001p00107>
8. Hombeck, R.; Keskin, P. The evolving impact of the Ogallala Aquifer – Agricultural adaptation to groundwater and climate. *US Natl. Bur. Econ. Res. Work. Pap.* 2011, 39, 17625.
9. Iverson, R.M. Landslide Triggering by Rain Infiltration. *Water Resour. Res.* 2000, 36, 1897-1910. <http://doi.org/10.1029/2000WR900090>
10. Jourabchi, P.; Lin, G.K.-C. Modeling Vapor Migration for Estimating the Time to Reach Steady State Conditions. *Groundw. Monit. Remediat.* 2021, 41, 25-32. <http://doi.org/10.1111/gwmm.12480>
11. Zolotov, O.I.; Ilyushina, A.N.; Novozhilov, I.M. Spatially distributed system for monitoring of fields technical condition in mineral resources sector. In Proceedings of the XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements, Saint-Petersburg, Russia, 26-28 May 2021; pp. 93-95.
12. Xing, L.; Wen, C.; Liu, Z.; Su, H.; Cai, J. Event-Triggered Adaptive Control for a Class of Uncertain Nonlinear Systems. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2017, 62, 2071-2076. <http://doi.org/10.1109/TAC.2016.2594204>
13. Feng, G. A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2006, 14, 676-697. <http://doi.org/10.1109/TFUZZ.2006.883415>
14. Hou, Z.; Xiong, S. On Model-Free Adaptive Control and Its Stability Analysis. *IEEE Trans. Autom. Control* 2019, 64, 4555-4569. <http://doi.org/10.1109/TAC.2019.2894586>
15. Hu, X.; Li, Y.; Che, X.; Hou, Z. Event-Based Adaptive Fuzzy Asymptotic Tracking Control of Uncertain Nonlinear Systems. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2021, 29, 3003-3013.
16. Golubev, V.O.; Litvinova, T.E. Dynamic simulation of industrial-scale gibbsite crystallization circuit. *J. Min. Inst.* 2021, 247, 88–101. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.10>
17. Tavernini, D.; Metzler, M.; Gruber, P.; Sorniotti, A. Explicit Nonlinear Model Predictive Control for Electric Vehicle Traction Control. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2019, 27, 1438-1451. <http://doi.org/10.1109/TCST.2018.2837097>
18. Guidelines on Alignment of Russian Minerals Reporting Standards and the CRIRSCO Template. Available online: https://www.criusco.com/docs/conversion_guidelines_final.pdf (accessed on 17 December 2021).
19. Federal Agency of Technical Control and Metrology. GOST 23278–78. Available online: <http://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=0&month=5&year=2017&search=23278&id=188687> (accessed on 15 November 2021).
20. Federal Agency of Technical Control and Metrology. GOST R 57700.2. Available online: <http://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=4&month=5&year=2017&search=&id=217662> (accessed on 15 November 2021).
21. Dashko, R.E.; Romanov, I.S. Forecasting of Mining and Geological Processes Based on the Analysis of the Underground Space of the Kupol Field as a Multicomponent System. *J. Min. Inst.* 2021, 247, 20-32. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.3>
22. Khabarov, N.; Smirnov, A.; Balkovič, J.; Skalský, R.; Folberth, C.; Van Der Velde, M.; Obersteiner, M. Heterogeneous Compute Clusters and Massive Environmental Simulations Based on the EPIC Model. *Modelling* 2020, 1, 215-224. <http://doi.org/10.3390/modelling1020013>
23. Korotenko, V.A.; Grachev, S.I.; Kushakova, N.P.; Mulyavin, S.F. Assessment of the Influence of Water Saturation and Capillary Pressure Gradients on Size Formation Of Two-Phase Filtration Zone in Compressed Low-permeable Reservoir. *J. Min. Inst.* 2020, 245, 569-581. <http://doi.org/10.31897/PMI.2020.5.9>
24. Reinecke, R.; Wachholz, A.; Mehl, S.; Foglia, L.; Niemann, C.; Döll, P. Importance of Spatial Resolution in Global Groundwater Modeling. *Groundwater* 2020, 58, 363-376. <http://doi.org/10.1111/gwat.12996>
25. Meshkov, A.A.; Kazanin, O.I.; Sidorenko, A.A. Improving the Efficiency of the Technology and Organization of the Longwall Face Move During the Intensive Flat-lying Coal Seams Mining at the Kuzbass Mines. *J. Min. Inst.*, 2021, 249, 342-350. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.3>
26. Kupfersberger, H.; Rock, G.; Draxler, J.C. Combining Groundwater Flow Modeling and Local Estimates of Extreme Groundwater Levels to Predict the Groundwater Surface with a Return Period of 100 Years. *Geosciences* 2020, 10, 373. <http://doi.org/10.3390/geosciences10090373>
27. Metzler, M.; Tavernini, D.; Gruber, P.; Sorniotti, A. On Prediction Model Fidelity in Explicit Nonlinear Model Predictive Vehicle Stability Control. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2021, 29, 1964-1980. <http://doi.org/10.1109/TCST.2020.3012683>
28. Klizas, P. Geofiltration studies of clay at the future radioactive waste repository for Ignalina nuclear power plant. *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.* 2021, 22, 219-225. <http://doi.org/10.3846/16486897.2014.903186>
29. Pashkevich, N.V.; Golovina, E.I. Topical issues of the management of extraction of underground waters on the territory of the Russian Federation. *J. Min. Inst.* 2014, 210, 99-107.
30. Takemura, J.; Yao, C.; Kusakabe, O. Development of a Fault Simulator for Soils under Large Vertical Stress in a Centrifuge. *Int. J. Phys. Model. Geotech.* 2020, 20, 118-131. <http://doi.org/10.1680/jphmg.18.00010>
31. Martirosyan, A.; Martirosyan, K. Quality improvement information technology for mineral water field's control. In Proceedings of the IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies, Nalchik, Russia, 4-11 October 2016; pp. 147-151.
32. Jensen, J.K.; Nilsson, B.; Engesgaard, P. Numerical Modeling of Nitrate Removal in Anoxic Groundwater during River Flooding of Riparian Zones. *Groundwater* 2021, 59, 866-877. <http://doi.org/10.1111/gwat.13108>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33942295>

33. Qin, H. Numerical groundwater modeling and scenario analysis of Beijing plain: Implications for sustainable groundwater management in a region with intense groundwater depletion. *Environ. Earth Sci.* 2021, 80, 499. <http://doi.org/10.1007/s12665-021-09795-0>

34. Medici, G.; Smeraglia, L.; Torabi, A.; Botter, C. Review of Modeling Approaches to Groundwater Flow in Deformed Carbonate Aquifers. *Groundwater* 2021, 59, 334-351. <http://doi.org/10.1111/gwat.13069>

35. Ou, G. Development of GUI Applications for Groundwater Modeling Using Python. *Groundwater* 2020, 58, 496-497. <http://doi.org/10.1111/gwat.12979>

36. Ilyushina, A.N.; Novozhilov, I.M. Development of the automated temperature field control system with a pulsed heating source. In Proceedings of the III International Conference on Control in Technical Systems, Saint-Petersburg, Russia, 30 October-1 November 2019; pp. 160-163.

37. Cao, Z.; Niu, Y.; Lam, H.-K.; Zhao, J. Sliding Mode Control of Markovian Jump Fuzzy Systems: A Dynamic Event-Triggered Method. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2021, 29, 2902-2915. <http://doi.org/10.1109/TFUZZ.2020.3009729>