



На правах рукописи

РОЩИНА Татьяна Константиновна

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ
МИНЕРАЛИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЛЕЧЕБНЫХ ГРЯЗЕЙ**

Специальность: 05.13.01 –
«Системный анализ, управление и обработка информации»
(вычислительная техника и информатика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1 0 ДЕК 2009

Новочеркасск – 2009

Диссертационная работа выполнена на кафедре тепловых электрических станций ГОУ ВПО Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института)

Научные руководители – кандидат технических наук, профессор

Ушаков Виталий Григорьевич ;

доктор технических наук, профессор

Ефимов Николай Николаевич

Официальные оппоненты – доктор технических наук, доцент

Веселов Геннадий Евгеньевич;

кандидат технических наук, доцент

Чернышев Александр Борисович

Ведущая организация – ГОУ ВПО Пятигорский государственный технологический университет, г. Пятигорск

Защита диссертации состоится «24» 12 2009 г. в 14 час. 20 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.208.22 Технологическом институте федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге (ТТИ ЮФУ) по адресу: 347928, Ростовская область, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ауд. Д-406.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ГОУ ВПО «Южный федеральный университет» по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, 148.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью предприятия, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «20» 11 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.208.22,
доктор технических наук, профессор



А.Н. Целих

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. В зоне Кавказских Минеральных вод одним из важных компонентов природных экосистем являются месторождения лечебных грязей, размещаемые в соленых озерах небольших размеров. Важной составляющей грязевых месторождений, кроме лечебной грязи, является рапа. Изучение динамики минерализации системы “рапа-лечебная грязь” было и остается одним из важнейших элементов мониторинга состояния грязевого месторождения, так как именно от значения этого показателя во многом зависят не только лечебные свойства добываемого пелоида, но и условия его новообразования.

Основу такого мониторинга в настоящее время составляют анализы проб рапы и лечебной грязи. Являясь ценными, с точки зрения описания предшествующей эволюции грязевого месторождения, эти данные не позволяют, во-первых, оценить влияние на величину минерализации рапы и пелоида таких факторов, как турбулентное движение рапы, условия на границах системы “рапа-лечебная грязь”, уменьшение/увеличение уровня рапы; во-вторых, получить обоснованный прогноз минерализации для будущих периодов; в-третьих, предложить более экономичные и дающие более достоверные результаты способы отбора проб рапы/пелоида. Ввиду невозможности проведения натурных экспериментов и физического моделирования грязевого месторождения наиболее приемлемым способом решения перечисленных выше вопросов является математическое моделирование.

Актуальность темы исследования подтверждена решением Пленума Ученого совета ГосНИИ курортологии (г. Пятигорск) от 13 июля 1999 г, а также Федеральными целевыми программами “Юг России (2002-2006 г.г.)” и “Экология и природные ресурсы России (2002-2010 года)”. Более того, в Федеральном законе “Об охране окружающей среды” лечебно-оздоровительные местности и курорты отнесены к особо охраняемым природным объектам, и закреплены такие принципы, как презумпция экологической опасности планируемой деятельности, приоритет сохранения естественных экологических систем, сохранение биологического разнообразия.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ заключается в системном анализе процессов протекающих в месторождениях лечебных грязей на основе математического моделирования процессов тепло- и массообмена соленых озер. Для этого необходимо:

- провести системный анализ процессов минерализации и переноса тепла грязевого месторождения и выделить основные параметры, оказывающие влияние на исследуемые процессы;
- разработать математические модели исследуемых процессов;
- создать комплекс программных средств для исследования и прогнозирования изменения основных количественных и качественных характеристик массообмена в рассматриваемом объекте – грязевом месторождении;

– на основе результатов проведенного системного анализа разработать рекомендации по практическому мониторингу и управлению минерализацией грязевого месторождения;

– разработать инструментарий для отбора проб рапы, которые используются для получения экспериментальных данных по минерализации рапы.

Научная новизна работы состоит в следующем:

– на основе системного анализа составлены математические модели исследуемых процессов и разработана методика оценки минерализации рапы и лечебной грязи. В результате определены различные пространственно-временные области концентрационного поля грязевого месторождения; определен характер влияния на минерализацию грязевого месторождения таких факторов, как ветровое движение рапы и изменение ее уровня;

– установлено существование в грязевом месторождении нескольких зон массообмена; доказана возможность применения математической модели, основанной на уравнениях диффузии, для описания динамики минерализации грязевого месторождения; доказано влияние толщины слоя рапы и ее возможного турбулентного движения на интенсивность явлений массообмена, происходящих в грязевом месторождении;

– разработана динамическая модель грязевого месторождения, которая показала возможность управления уровнем рапы;

– предложен научно-обоснованный способ отбора проб рапы, позволяющий получать объективные данные об ее минерализации. Способ отличается от существующих тем, что при минимальных (однократных) затратах на эксперимент дает возможность оценить не только актуальное состояние грязевого месторождения, но и прогнозировать направление его развития.

Практическое значение работы. Разработанная методика расчета нестационарных концентрационных полей химических компонентов, содержащихся в рапе и в лечебной грязи, и их реализация в виде единого программного комплекса позволяет:

– прогнозировать концентрацию ионов солей, входящих в состав рапы и лечебной грязи в любой момент времени в любой точке по глубине водосема и толщине пласта лечебной грязи;

– прогнозировать динамику состава, а значит и качество лечебной грязи;

– определить горизонт, на котором добываемая лечебная грязь имеет в данный момент времени оптимальный химический состав;

– организовать мониторинг состояния лечебной грязи на месторождении.

Результаты исследования динамической модели изменения уровня рапы позволяют применять обоснованные решения по регулированию поверхностного стока.

Разработан приборный инструментарий для отбора проб рапы на грязевом месторождении.

Достоверность и обоснованность результатов. Системный анализ проводился с применением математических моделей, для которых использовались фундамен-

тальные законы переноса массы и тепла с учетом физических особенностей исследуемых процессов. Адекватность математических моделей подтверждается удовлетворительным согласованием экспериментальных и расчетных результатов в широком диапазоне изменения характерных параметров. Достоверность научных положений обеспечивается использованием классических численных методов решения задач тепло- и массообмена, совпадением результатов расчетов и экспериментальных материалов.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ. Комплекс программных средств для расчета концентрационных полей химических компонентов в рапе и в лечебной грязи принят к использованию (имеется акт) в ОАО “Кавминкурортресурсы” (г. Ессентуки). Прибор для отбора проб рапы на грязевом месторождении принят к использованию (имеется акт) в отделе “Изучение курортных ресурсов” ГосНИИ курортологии (г. Пятигорск).

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Научные результаты и положения диссертационной работы докладывались на международных научных конференциях: “Математические методы в технике и технологиях” (г. Новгород, 1999 г.; г. Санкт-Петербург, 2000 г.; г. Тамбов, 2002 г.); на научно-практической конференции, посвященной 80-летию ГНИИК (г. Пятигорск, 1999 г.); на IV объединенной научной сессии, посвященной 30-летию Северо-Кавказского научного центра высшей школы (г. Ростов-на-Дону, 1999 г.); на юбилейной научно-практической конференции “Актуальные вопросы курортной науки в России” (г. Пятигорск, 2000 г.); на Международной научно-практической конференции “Теория, методы и средства контроля и диагностики” (г. Новочеркасск, 2000 г.); на VI-ой Международной теплофизической школе “Теплофизические измерения в начале XXI века” (г. Тамбов, 2001 г.); на межрегиональной научно-практической конференции “Устойчивая безопасная энергетика – основа эффективного социально-экономического развития региона” (г. Ростов-на-Дону, 2002 г.), на II-й Региональной научно-технической конференции «Управление в технических, социально-экономических и медико-биологических системах» (г. Новочеркасск, 2002 г.), а также на научных семинарах кафедр “Теоретические основы теплотехники”, “Тепловые электрические станции” и “Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами” Южно-Российского государственного технического университета.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ:

- нестационарные математические модели массообмена между рапой и лечебной грязью на грязевом месторождении, описываемые уравнениями в частных производных;
- методика расчета зон массообмена на месторождении лечебной грязи;
- методика контроля и прогнозирования величины минерализации различных компонентов грязевого месторождения;
- методика отбора проб рапы на месторождении лечебной грязи;

– комплекс программных средств для исследования и прогнозирования изменения основных количественных и качественных характеристик массообмена в рассматриваемом объекте – грязевом месторождении;

– результаты системного анализа процессов, происходящих в месторождения лечебных грязей Табуканского озера.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Содержит 187 страниц основного текста, список литературы из 116 наименований, приложения на 33 страницах.

Содержание работы

Первая глава представляет критический обзор состояния вопроса. В ней дается общая характеристика грязевых месторождений как источников уникального лечебного средства – лечебных грязей (пелоидов). При этом особо выделяются месторождения, связанные с солеными озерами, которые наиболее часто используются в подобных целях. Разнообразные геолого-гидрогеологические, климатические, физико-химические, биологические факторы в различной их комбинации порождают множество альтернативных сценариев эволюции соленых озер.

Одним из важнейших показателей, по которому оценивают и пелоид и рапу соленого озера (грязевого месторождения), является их минерализация. В пелоиде этот параметр относится к его жидкой фазе – грязевому раствору.

Очевидно, что любой природный объект, тем более такой уникальный, как грязевое месторождение, следует относить к сложным системам, а задачу его сохранения – рассматривать как стратегическую. Попытки управления минерализацией содержат существенный элемент риска, т.к. могут привести в действие необратимые процессы. Вышеперечисленные факторы делают обоснованным применение системного анализа для исследования проблем минерализации соленого озера.

Анализ проводится с помощью математических моделей, основанных на естественных физических инвариантах, описывающих перенос вещества и тепла, заданных в виде соотношения между потоком тепла/массы и их градиентом. Для массопереноса общее итоговое уравнение потока представляется в виде

$$q = - D_{\Sigma} \cdot \text{grad } c, \quad (1)$$

где q – поток вещества ($г/(с \cdot м^2)$), c – его концентрация ($г/м^3$), D_{Σ} – аддитивный коэффициент диффузии ($м^2/с$), учитывающий различные виды массопереноса (молекулярного, капиллярного, осмотического, турбулентного).

Закон сохранения массы (фундаментальный естественный инвариант) в двухслойной системе “рапа-лечебная грязь” приводит к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial c_p}{\partial \tau} = D_p \Delta c_p; \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_g}{\partial \tau} = D_g \Delta c_g, \quad (3)$$

где индекс “р” означает, что параметры и переменные относятся к слою рапы, а индекс “г” – к слою лечебной грязи; τ – время; Δ – оператор Лапласа. Совместное решение (2) и (3) позволяет определить концентрацию веществ в любой точке месторождения в любой момент времени.

Отмечено, что, несмотря на многообразие исследований, проводимых в ГосНИИ курортологии (г. Пятигорск), Объединении “Кавказские минеральные курортные ресурсы” (г. Ессентуки), Центральном НИИ курортологии (г. Москва), в Ростовском государственном университете, в Новочеркасской государственной мелиоративной академии, нашедших отражение в работах П.А. Кашинского, О.Ю. Волковой, Д.Н. Вайсфельда, В.Б. Адилова, В.Т. Олиференко, Ф.М. Эффендиевой, В.Г. Ушакова, Е.Г. Потапова, С.Р. Данилова, Ю.А. Федорова и др., описанный выше подход к анализу изменения минерализации нигде не применялся, а основное внимание уделялось химическим реакциям между отдельными компонентами рапы.

В конце главы сформулирована постановка задачи исследований.

Вторая глава посвящена построению математической модели процесса массопереноса в грязевом месторождении. На рисунке 1 представлено схематическое изображение грязевого месторождения, где h_p – глубина (толщина) рапы; h_g – толщина слоя лечебной грязи; h_M – общая глубина месторождения, $h_M = h_p + h_g$.

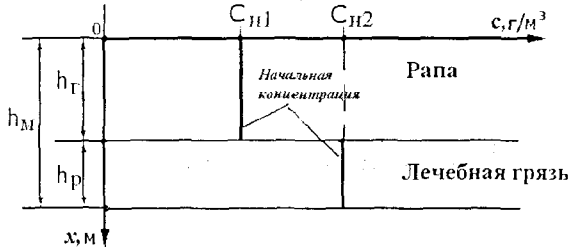


Рисунок 1. Схематическое изображение грязевого месторождения.

Диффузией (массопереносом), если не оговорено особо, будем считать процесс самопроизвольного распространения вещества в направлении убывания его концентрации, обусловленный тепловым движением молекул. О наличии диффузии в грязевом месторождении свидетельствует тот факт, что минерализация лечебной грязи больше минерализации рапы, а минерализация на поверхности водоема меньше, чем в его нижних слоях.

Исходная модель массопереноса использует следующие допущения: отсутствие движение жидкой фазы грязи (грязевого раствора), конвективного движения в рапе, электрического градиента, влияющего на подвижность отдельных ионов; многокомпонентная рапа заменяется бинарным раствором соли, имеющей наименьший (в сравнении с другими солями рапы) коэффициент диффузии. Коэффициент диффузии соли в лечебной грязи пропорционален плотности грязи и определяется из выражения $D_g = \varphi(\rho) \cdot D_p$, где ρ – плотность грязи. В работе ис-

пользовано значение $\varphi(\rho) = 0,521$, соответствующее тамбуканской лечебной грязи с плотностью $\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$.

Тогда уравнение диффузии исследуемого вещества в грязевом месторождении выглядит следующим образом

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x) \frac{\partial c}{\partial x} \right) + D(x) \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D(x) \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}, \quad (4)$$

где коэффициент диффузии есть функция

$$D(x) = \begin{cases} D_p, & 0 \leq x \leq h_p, \\ D_r, & h_p < x \leq h_M. \end{cases} \quad (5)$$

Начальное условие для (4) задается одномерной (что тоже относится к используемым допущениям) функцией

$$c(x, y, z, 0) = \mu(x) = \begin{cases} c_{111}, & 0 \leq x \leq h_p, \\ c_{112}, & h_p < x \leq h_M. \end{cases} \quad (6)$$

значения которой могут быть получены прямым экспериментом.

Все использованные для (4) граничные условия относятся к условиям первого или второго рода. На поверхности водоема в качестве постоянно действующего условия принято

$$c(0, y, z, \tau) = v(\tau) = c_0, \quad (7)$$

называемое “условием опреснения”, т.к. значение c_0 в любой момент времени меньше концентрации вещества на любой другой глубине.

Ввиду того, что на нижней границе грязевого месторождения точно установить вид граничных условий невозможно, были исследованы два варианта – условие первого рода (8), построенное из условия сопряжения с начальным условием, что, в свою очередь, налагает ограничения на выбор величины h_M ; и однородное граничное условие второго рода (9) – “условие непроницаемости” нижней границы:

$$c(h_M, y, z, \tau) = \mu(h_M); \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial c}{\partial n} \right|_{x=h_M} = 0. \quad (9)$$

Кроме того, из условия непрерывности самой концентрации и потока вещества при $x = h_p$ следует, что

$$c(h_p + 0, y, z, \tau) - c(h_p - 0, y, z, \tau) = 0, \quad (10)$$

$$\left(D(x) \frac{\partial c}{\partial n} \right)_{x=h_p+0} - \left(D(x) \frac{\partial c}{\partial n} \right)_{x=h_p-0} = 0$$

Особое место в построении модели играет процедура приведения ее к безразмерному виду – нормализация. Переход к безразмерным переменным позволяет использовать одномерную (зависящую только от одной пространственной переменной) функцию $\bar{c}(\bar{x})$, а также существенно расширяет область применимости

полученных решений. В результате процедуры нормализации вместо уравнения (4) получено уравнение

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial Fo} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{D}(\bar{x}) \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} \right), \quad (11)$$

где $\bar{c} = (c - c_{\text{MIN}}) / (c_{\text{MAX}} - c_{\text{MIN}})$ – относительная концентрация; $\bar{x} = x/h_M$; $Fo = \tau \cdot D_p / h_M^2$ – число Фурье (“безразмерное” время); $\bar{D} = D / D_p$ – безразмерный коэффициент диффузии; $c_{\text{MIN}} = \min v(\tau)$; $c_{\text{MAX}} = \max \mu(x)$. Аналогичным преобразованиям были подвергнуты и краевые условия (6) – (10). При принятых допущениях “условие опреснения” поверхности водоема (7) преобразуется к однородному граничному условию первого рода. В дальнейшем, для упрощения обозначений, символы “-” над безразмерными переменными опускаем.

Решение полученного линейного однородного параболического уравнения (11) выполнялось при помощи численного метода, основанного на приведении исходной краевой задачи к системе линейных алгебраических уравнений, которые получаются при аппроксимации операторов дифференцирования их разностными аналогами. Для этого:

- определяется общее время наблюдения Fo_{max} ;
- отрезок $[0; 1]$ оси Ox делится на N равных частей с шагом Δx . Полученные при этом точки образуют сетку ω_x . Аналогично строится сетка ω_{Fo} – делением отрезка $[0; Fo_{\text{max}}]$ оси $O Fo$ на M равных частей с шагом ΔFo ;
- сетки ω_x и ω_{Fo} объединяются в двумерную сетку $\omega_x \times \omega_{Fo}$, на которой с использованием интегринтерполяционного метода строится однородная консервативная разностная схема вида

$$\frac{c_{i,j}^{j+1} - c_{i,j}^j}{\Delta Fo} = \sigma \cdot \frac{D_{i+1} c_{x,i}^{j+1} - D_i c_{x,i}^{j+1}}{\Delta x} + (\sigma - 1) \cdot \frac{D_{i+1} c_{x,i}^j - D_i c_{x,i}^j}{\Delta x}, \quad (12)$$

$$i = 1 \dots (N-1), j = 1 \dots M, 0 \leq \sigma \leq 1.$$

Здесь $c_{i,j}^j = c(x_i, Fo_j)$; $D_i = 0,5 \cdot (D(x_{i-1}) + D(x_i))$; $c_{x,i}^j = (c_{i,j}^j - c_{i-1,j}^j) / \Delta x$; $c_{x,i}^{j+1} = (c_{i,j+1}^{j+1} - c_{i,j}^{j+1}) / \Delta x$.

Неизвестными являются c_{i-1}^{j+1} , c_i^{j+1} , c_{i+1}^{j+1} . Весовой коэффициент σ определяет способ получения неизвестных. Он же использовался для управления такими свойствами получаемого решения, как устойчивость, сходимость, точность. Для практических расчетов применялись схемы, обладающие безусловной устойчивостью: чисто неявная схема ($\sigma = 1$) и симметричная схема ($\sigma = 0,5$). Погрешность аппроксимации уравнения (11) схемой (12) есть $O(\Delta Fo^m + \Delta x^2)$, где $m = 1$, если $\sigma \neq 0,5$, и $m = 2$, если $\sigma = 0,5$. После присоединения к системе (12) аналогичным образом преобразованных граничных условий, была получена система линейных уравнений, которая решалась методом прогонки.

Анализ решения показал, прежде всего, безразличие системы к виду граничных условий [(8) или (9)] на нижней границе месторождения ($x = h_M$) – относительная разность между двумя видами результата не превышает 0,1%. Поэтому

в дальнейшем при $x = h_M$ применялось условие (8). Тогда для решаемого уравнения (в любом его виде) справедливо свойство, называемое “принципом максимума”, что сразу дает первый результат – минерализация рапы и лечебной грязи в грязевом месторождении не может возрастать.

Особенность краевых условий, выраженная в равномерном распределении вещества по слоям рапы и лечебной грязи в начальный момент времени при общем градиенте концентрации, направленном вертикально вниз, приводит к тому, что в течение некоторого времени после начала процесса диффузии в рапе существует область, в которой концентрация вещества остается постоянной. Далее такая область будет называться “безградиентной зоной” – БГ зоной. БГ зона определялась по результатам решения системы (12), причем анализировалась не производная функции $c'(x_i)$, $i = 0 \dots N_p - 1$, где N_p – последняя точка сетки ω_x , относящаяся к рапе, а выражение $|1 - \cos'_i| \leq \varepsilon$, где $\cos'_i = \frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + (c'_{i+1} - c'_i)^2}}$, ε – заранее

заданная погрешность вычислений, лежащая в интервале $[0,0001; 0,001]$.

Динамика БГ зоны показана на рисунке 2. Кроме сохранения постоянной концентрации в БГ зоне, ее наличие характеризуется повышением концентрации вещества в области, лежащей ниже нижней границы БГ зоны. Информация о наличии БГ зоны в рапе особенно важна при планировании экспериментов, связанных с отбором проб. Поэтому были разработаны алгоритмы для определения ее верхней и нижней границ по результатам решения системы (12), произведена аппроксимация этих границ прямыми линиями ($x_B = a_{0B} + a_{1B} \cdot F_0$ и $x_H = a_{0H} + a_{1H} \cdot F_0$), а при совместном рассмотрении этих прямых получены формулы для определения момента времени и глубины, на которой исчезнет БГ зона.

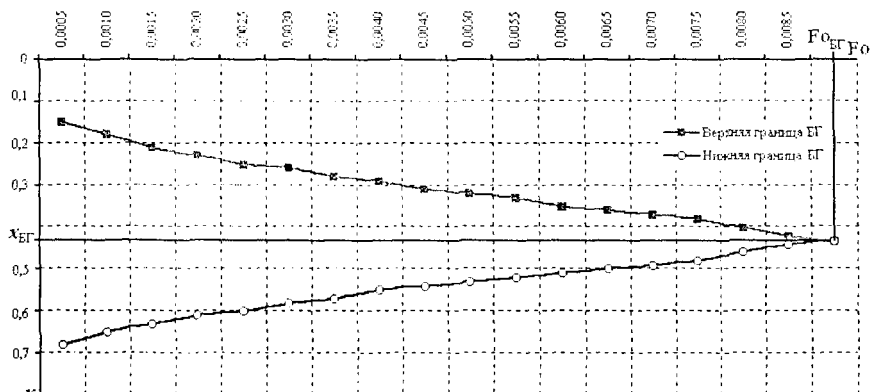


Рисунок 2. Динамика БГ зоны в рапе грязевого месторождения.

$$x_{БГ}(h_p, c_{Н1}) = (-0,0095 + 0,004 \cdot c_{Н1}) + \quad (13)$$

$$+ (0,5 + 0,093 \cdot c_{Н1}) \cdot h_p + (-0,029 + 0,022 \cdot c_{Н1}) \cdot h_p^2,$$

$$Fo_{БГ}(h_p, c_{Н1}) = (-0,000202 + 0,000611 \cdot c_{Н1} - 0,000349 \cdot c_{Н1}^2) + \quad (14)$$

$$+ (-0,002 - 0,00137 \cdot c_{Н1} + 0,000509 \cdot c_{Н1}^2) \cdot h_p +$$

$$+ (0,0146 - 0,00548 \cdot c_{Н1} + 0,00631 \cdot c_{Н1}^2) \cdot h_p^2.$$

Выражение (13) есть зависимость глубины исчезновения БГ зоны от толщины слоя рапы (h_p) и начальной относительной концентрации вещества в нем ($c_{Н1}$). Выражение (14) определяет аналогичную зависимость для времени. Фигурирующие в формулах переменные и сами функции – безразмерны. Исследования показали, что все остальные параметры модели не оказывают сколь-нибудь заметного влияния на $x_{БГ}$ и $Fo_{БГ}$.

Еще одно исследование поведения модели касалось вида решения при бесконечном увеличении времени ($Fo \geq 0,05$) – наличие “регулярного режима”, существование которого следует из обобщенной теоремы Кондратьева для составных систем и общей теории параболических уравнений. Так как нет аналитических методов для определения параметров регулярного режима в задачах вида (4) – (10), то был разработан алгоритм их получения по результатам решения системы (12) при весовом коэффициенте $\sigma = 0,5$ – именно в этом случае применяемая аппроксимация обладает условной асимптотической устойчивостью. Анализируя выполнения условия

$$\Delta(\lg \Delta c_i^j) = \text{const}, j = 0, 1, \dots, M-2; 1 \leq i \leq N-1,$$

где $\Delta c_i^j = c_i^{j+1} - c_i^j$, $\Delta(\lg \Delta c_i^j) = \lg \Delta c_i^{j+1} - \lg \Delta c_i^j$, для каждого слоя – рапы и лечебной грязи – получены параметры выражения

$$c(x, Fo) = c_{лр} + A(x) \cdot e^{-m \cdot Fo},$$

где $c_{лр}$ – предельное значение относительной концентрации вещества, $m > 0$ – темп уменьшения концентрации. Так как система состоит из двух слоев, то $c_{лр}$ и m представляются в виде функций от x , причем m остается постоянным в пределах одного слоя с относительной погрешностью, не превышающей 7,5 %. Хотя время начала регулярного режима очень велико ($Fo = 0,05$ – это больше 50 лет), полученные зависимости хорошо согласуются теоретическими выкладками, приведенными в литературе, что доказывает правильность примененных методов.

Одним из допущений, использованных в работе, было заключение о том, что единственным видом движения, переносящим рапу в вертикальном направлении, является ее турбулентное движение, образуемое как сумма горизонтального ветрового течения и волн на поверхности озера. В этом случае в рапе необходимо учитывать турбулентную диффузию с коэффициентом D_T . Считая, что турбулентный перенос охватывает всю область рапы и $D_T = 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, получены результаты для различных видов граничных условий на поверхности рапы: при условии опреснения и условии непроницаемости. Любое из этих условий приводит к тому, что за сравнительно небольшой промежуток времени (от одного года до двух) система переходит в стационарное состояние, характеризующееся равномерным распреде-

лением вещества в слое рапы. При этом концентрация вещества в рапе либо равна концентрации на ее поверхности, либо примерно на 3% больше своего начального значения. Ранее выявленная пространственно-временная область рапы, названная БГ зоной, все равно сохраняется, что приводит к кратковременному повышению концентрации вещества в рапе ниже нижней границы БГ зоны. Для практических исследований, период которых не превышает трех лет, можно считать, что концентрация вещества в лечебной грязи не зависит ни от наличия турбулентной диффузии в рапе, ни от вида граничных условий при $x = 0$. Проведено исследование построенной модели при периодически действующей турбулентной диффузии – через 1-3 месяца в течение 3-7 дней. Главная особенность полученного результата – постоянное наличие в рапе области, аналогичной БГ зоне.

Дальнейшее усложнение модели массопереноса связано с более подробным изучением коэффициента диффузии вещества в лечебной грязи. Например, при загрузке лечебной грязи в хранилище наблюдается временное ее уплотнение, что нашло отражение в замене постоянного D_T функцией

$$D_T(x, Fo) = \frac{1}{\sqrt{a^2 + (x - a)^4}} \cdot 1,01^{-b \cdot Fo^2}, \text{ где параметры } a \text{ и } b \text{ подбирались в}$$

процессе проведения численных экспериментов. Расчеты показали, что этот процесс (уплотнение) не оказывает заметного влияния на распределение вещества в лечебной грязи.

Исследования модели, в которой слой грязи несколькими слоями донных отложений с различными физико-химическими характеристиками [т.е. коэффициент диффузии D_T представлен функцией $D_T(x)$], показали, что такое уточнение вносит незначительные – порядка 0,8% – отличия в результаты расчетов (по сравнению с “однослойной моделью”).

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ рассмотрена модель массопереноса в грязевом месторождении при изменяющемся во времени уровне рапы. Для удобства представления ось Ox (см. рисунок 1) развернута вертикально вверх, а ее начало лежит на нижней границе месторождения. Вводится новая произвольная функция $\chi(\tau)$, описывающая закон изменения уровня рапы (или общей глубины месторождения, если $\chi(\tau)$ положить равным $\chi(\tau) + h_T$). С учетом замены направления Ox уравнение (4), коэффициент диффузии (5), граничное условие при $x = 0$ (8-9) (теперь это нижняя граница месторождения), условие сопряжения слоев (10) рапы и лечебной грязи, остаются теми же самыми. Граничное условие на поверхности водоема задается концентрацией вещества в точке $(\chi(\tau), \tau)$ и может быть либо условием непроницаемости, либо условием опреснения. Исходное уравнение (4) сначала приводится к уравнению с постоянным коэффициентом диффузии, для чего применяется дифференциальное подобие вида

$$x' = \begin{cases} \frac{D_p}{D_\Gamma} x & , 0 \leq x < h_\Gamma, \\ \frac{D_p}{D_\Gamma} h_\Gamma + (\chi(\tau) - h_\Gamma), & h_\Gamma \leq x \leq \chi(\tau). \end{cases} \quad (15)$$

деформирующее слой лечебной грязи таким образом, чтобы $D_\Gamma = D_p$. Затем, применив подстановку $\bar{x} = x/\chi(\tau)$ и вводя относительную концентрацию $\bar{c} = (c - c_{\text{MIN}}) / (c_{\text{MAX}} - c_{\text{MIN}})$, получено уравнение

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D(\tau) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + v(x, \tau) \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (16)$$

в котором символы “-” над переменными для удобства опущены; $D(\tau) = D_p / \chi(\tau)$; $v(x, \tau) = x \cdot \chi'(\tau) / \chi(\tau)$. Область определения переменной x в уравнении (16) принадлежит отрезку $[0; 1]$. Для решения этого уравнения была построена безусловно устойчивая разностная схема, обеспечивающая погрешность аппроксимации $O(\Delta x^2 + \Delta \tau)$, и приводящая к системе уравнений

$$A_i c_{i-1}^{j+1} - B_i c_i^{j+1} + C_i c_{i+1}^{j+1} = -F_i, \quad i = \dots, N-1, \quad (16a)$$

где $A_i = \frac{\bar{D}}{\Delta x^2} (\alpha_i - b_i^- \cdot \Delta x)$; $C_i = \frac{\bar{D}}{\Delta x^2} (\alpha_i + b_i^+ \cdot \Delta x)$; $B_i = 1/\Delta \tau + A_i + C_i$; $F_i = c_i^j / \Delta \tau$;

$\bar{D} = D(\tau_{j+1/2})$ – коэффициент диффузии в момент времени $\tau_{j+1/2} = \tau_j + \Delta \tau / 2$; величины α_i, b_i^\pm также вычисляются для этого момента времени по правилам:

$\alpha_i = (1 + 0,5 \cdot \Delta x \cdot |v(x_i, \tau_{j+1/2})| / D(\tau_{j+1/2}))^{-1}$; $b_i^\pm = r_i^\pm / D(\tau_{j+1/2})$; $r_i^\pm = 0,5 \cdot (v(x_i, \tau_{j+1/2}) \pm |v(x_i, \tau_{j+1/2})|)$; $r_i = 0,5 \cdot (v(x_i, \tau_{j+1/2}) - |v(x_i, \tau_{j+1/2})|)$; c_i^j – значение концентрации вещества в точке x_i в момент τ_j ; Δx и $\Delta \tau$ – шаг по пространственной переменной и по времени соответственно.

Так как (16) не является полностью безразмерным уравнением, в качестве D_p использовался коэффициент диффузии сульфата магния в бинарном водном растворе. Для сравнения результатов, полученных при различных модификациях модели, использовалась средняя концентрация вещества в момент времени τ_j , рассчитанная по формуле

$$c_{CP}(\tau_j) = \frac{x_b \int c(x, \tau_j) dx}{x_b - x_a} \quad (17)$$

отдельно для слоя рапы и слоя грязи.

Главный вывод – рассчитанное по формуле (17) среднее значение концентрации одного вещества в рапе при условии опреснения поверхности водоема с точностью до постоянного множителя достаточно хорошо совпадает с имеющимися результатами наблюдений за минерализацией рапы. Если такой множитель

равен 0,01 л/г, начальная безразмерная концентрация вещества в рапе 0,62, то в 64% случаев относительное отклонение расчетных и фактических данных не превышает 6%, а для 83% случаев это отклонение не превышает 12% (рисунок 3). Адекватность предложенной модели подтверждается и согласованием расчетных данных с результатами экспериментальных исследований, выполненных на Тамбуканском месторождении ГосНИИ курортологии (г. Пятигорск), ОАО “Кавминкурортресурсы” (г. Ессентуки), Комитетом природных ресурсов Ставропольского края (г. Ставрополь).

При модификации граничного условия первого рода на поверхности рапы (если сделать его непостоянным) совпадение расчетных и фактических данных будет еще больше – 83 % и 96 % соответственно. К сожалению, в настоящее время наблюдений минерализации на поверхности водоема не проводится, поэтому результат имеет теоретический характер.

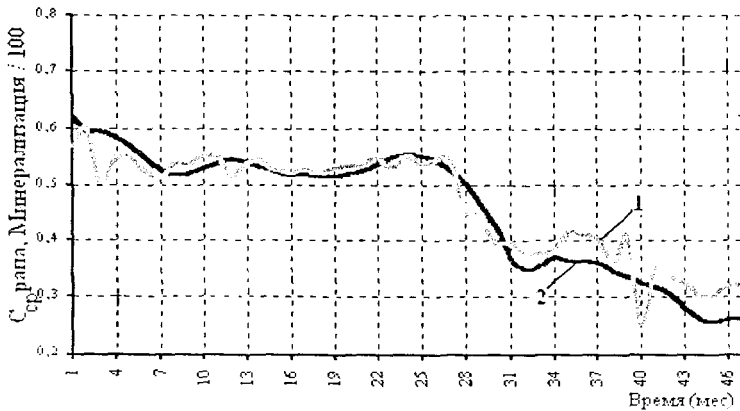


Рисунок 3. Сравнение расчетной относительной концентрации (линия 2) и фактической безразмерной минерализации (линия 1)

Тем не менее, при наличии таких данных становится реальной возможность прогнозирования минерализации на сколь угодно длительный период – для этого необходим некоторый начальный набор экспериментальных значений, по которым будет настроена модель – выбрана начальная концентрация c_{11} , а затем, используя предполагаемые значения глубины рапы и концентрации вещества на ее поверхности, получают прогнозируемые значения минерализации.

По результатам анализа различных вариантов решения предложен следующий практический способ прогнозирования минерализации рапы: за единицу измерения времени берется 5 лет; глубина грязи $h_r = 400$ см; коэффициент диффузии в рапе $D_p = 10,259$ см²/5лет; коэффициент диффузии в грязи $D_r = D_p \cdot 0,521$; на-

чальный момент времени соответствует январю 1982 г; начальная относительная концентрация $c_0 = 0,62$. Решается система уравнений (16а) для заданного момента времени, отстоящего от начального на целое число месяцев. В работе приведен алгоритм для среды Microsoft Excel, реализующий предложенный расчет. Расчет предусматривает ввод начальных данных в единицах измерения и терминах, понятных пользователю, а результат выдает в наглядной графической форме. Процедура может выполняться для получения значений средней минерализации в водоеме, а также на определенной глубине или на определенную дату. Графики, приведенные на рисунке 3, получены при помощи этого расчета.

Основные выводы, полученные по результатам исследования модели массопереноса и сопоставления этих результатов с фактическими данными:

- на поверхности рапы постоянно действует граничное условие первого рода;
- турбулентная диффузия (ветровое перемешивание) не может существовать во всей толще рапы и, следовательно, не может приводить к уничтожению концентрационной стратификации в рапе;
- нелинейный характер массопереноса приводит к тому, что кроме отрицательной связи между уровнем рапы и ее минерализацией (повышение уровня ведет к уменьшению минерализации), существует и положительная обратная связь, когда одновременно понижаются и уровень водоема и его минерализация.

Что касается БГ зоны, то она существует и в этой модели, но ее математическое описание существенно сложнее. Поэтому для определения границ БГ зоны предлагается использовать ранее разработанные алгоритмы.

В заключение отметим, что минерализация лечебной грязи убывает безотносительно того, как колеблется уровень рапы. И если за пять лет эта убыль незначительна (примерно 1% от начального значения), то для более продолжительных периодов, используемых при оценке общих запасов пелондов, этот фактор следует принимать во внимание.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ описаны процедуры отбора проб рапы, полученные на основе результатов главы 2 и учитывающие цель эксперимента. Так, при изучении стратификации рапы необходимы предварительные расчеты, выявляющие БГ зону. Используемые в (12) разностные аппроксимации операторов дифференцирования дают возможность сделать заключение о направлении изменения минерализации, или оценить реальный коэффициент диффузии исследуемого вещества в лечебной грязи, и даже сделать простейший прогноз значения концентрации вещества в одной точке.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ проводится исследование грязевого месторождения (на примере Табуканского озера) как объекта управления. Из результатов, описанных в предыдущих главах работы, следует вывод – минерализация рапы зависит от уровня озера. Однако именно минерализация есть ключевой фактор, который делает озеро ценным природным объектом: ее увеличение, например, до уровня

выше 270 г/л приводит не только к выпадению осадков солей (сульфата натрия), но и к природной стерилизации водоема. В тоже время обратный процесс – опреснение – также губителен для пелоида, так как вызывает развитие пресноводного цианоза, в результате которого не только прекращается образование новых грязей, но изменяются (ухудшаются) лечебные свойства уже имеющейся залежи. Изложенные выше соображения приводили к тому, что на протяжении всего времени использования разных грязевых озер постоянно предпринимаются попытки управления уровнем рапы – причем не всегда успешные. Имеется ряд примеров (Сакское озеро, Ханское и др.), когда непродуманное вмешательство привело к безвозвратной утрате ценных месторождений. Средства “управления” уровнем небольших озер хорошо известны: переброс воды по искусственному каналу из соседнего водоема (озера); бурение специальных питающих скважин; разворачивание временных гидротехнических сооружений, выполненных из современных тканевых материалов; дополнительное залесение водосбора. Относительная доступность перечисленных мер, без достаточного обоснования последствий их применения, зачастую дают результат, обратный ожидаемому.

В настоящее время существует целый ряд работ, посвященных вопросам динамики и устойчивости состояний водных объектов – Каспийского, Азовского, Черного, Аральского морей, Мирового океана. Но размеры этих объектов (и происходящих в них процессов) на несколько порядков превышают те, что имеют место для относительно небольших (общая площадь водосбора, включая само озеро, до 2000 га, глубины – не превышают 10 м) озер. В работе ставилась задача – установить основные закономерности, действующие в нелинейной динамической системе, которой, безусловно, является грязевое месторождение, с целью дальнейшего использования их (закономерностей) для управления подобными системами.

Использовалось следующее уравнение водного баланса:

$$\frac{dH}{d\tau} = \frac{q}{S(H)} - E(H), \quad (18)$$

где H – уровень водоема, τ – время, q – средняя величина осадков (и стоков), питающих озеро, S – площадь акватории, E – слой испарения. H является управляемой величиной, q – управляющий параметр.

Исследование основного уравнения (18) предварялось следующими результатами.

По данным многолетних наблюдений на Тамбуканском озере был построен фазовый портрет (ось Ox – наблюдения, ось Oy – приращения) уровня водоема.

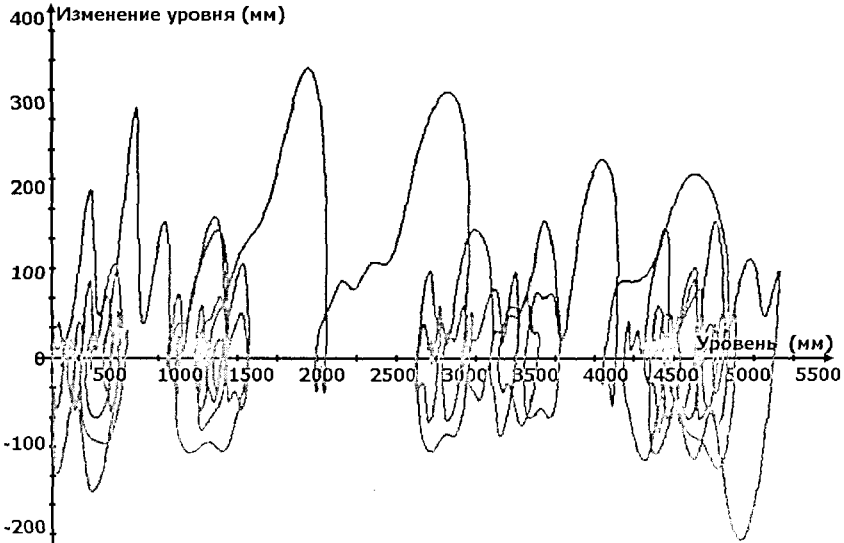


Рисунок 4. Фазовый портрет для изменения уровня воды по результатам ежемесячных наблюдений.

Согласно рисунку 4 делается предположение о наличии в озере нескольких стационарных состояний (странных аттракторов), возле которых происходят колебания уровня.

Также по результатам наблюдений проведена аппроксимация зависимости $S(H)$. Аналитически она представляется следующей формулой (где H – обозначение безразмерной переменной, совпадающей по величине с глубиной водоема):

$$\begin{aligned}
 S(H) = & 3,9083251 \cdot 10^{-4} \cdot H^9 - 0,009087 \cdot H^8 + 0,0892225 \cdot H^7 - \\
 & - 0,4825365 \cdot H^6 + 1,5732083 \cdot H^5 - 3,1772979 \cdot H^4 + 3,9046379 \cdot H^3 - \\
 & - 2,6991668 \cdot H^2 + 1,0167495 \cdot H + 1,449017
 \end{aligned}$$

Приведенная формула использовалась для определения площади водоема при значениях уровня, не совпадающих с результатами наблюдений.

Для получения принципиальных выводов о динамике уровня относительно q из (18) сделаны следующие допущения: отдельно не выделяются поверхностный сток, осадки, не учитывается влияние эвапотранспирации на площади водосбора, так как интерес представляет не абсолютное значение управляющего параметра, а поведение системы при его (параметра) возмущениях.

Более важным представляется анализ поведения слоя испарения $[E$ в уравнении (18)]. Для исследования функции $E(H)$ были использованы следующие зависимости:

– уравнение Н.Н. Иванова:

$$E = 0,0018 \cdot (25 + T)^2 (100 - T), \quad (19)$$

где E – испаряемость (мм), T – средняя температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), r – средняя относительная влажность воздуха за месяц (%). Хотя, в общем случае, величина испаряемости не совпадает со слоем испарения, для водных поверхностей такое различие минимально. С учетом того, что относительная влажность представляет собой отношение упругости водяного пара к упругости насыщения φ , для определения последней используется

– уравнение Клаузиуса-Клапейрона:

$$\varphi = \varphi(T_c) \exp\left[\frac{L}{R_n} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (20)$$

где $L=2495$ кДж/кг – удельная теплота парообразования, $R_n=0,461$ кДж/(кг·К) – газовая постоянная водяного пара, T_c – некоторая фиксированная (средняя за период наблюдения) температура, $\varphi(T_c)$ – упругость насыщения при температуре T_c . Важной особенностью (19) является наличие функции T , которую для целей работы представляли в виде $T = T(H)$.

Совместное применение (19) и (20) позволило получить зависимость $E(H)$, после того, как была определена функция $T = T(H)$. Данная функция найдена по следующей схеме: построена модель тепловых процессов в водоеме, и на ее основании – получена зависимость тепловых колебаний рапы от ее уровня.

Температурное поле водоема моделируется при помощи уравнения, описывающего задачу Стефана (учитывает особенность небольших озер, когда при температурах меньше 0 может покрыться льдом вся их поверхность):

$$\left(\lambda(T, x) - R \cdot \delta(T - T_{\text{л}})\right) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial x} \left(k(T, x) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_0(\tau), \quad (21)$$

где T – температура; x – пространственная координата, ось которой направлена вертикально вверх, а 0 лежит на нижней границе системы; $\lambda(T, x)$ – коэффициент теплоемкости, имеющий разрывы 1-го рода на границе рапа-грязь (при $x = h_{\Gamma}$ и выражается зависимостью от x) и на границе жидкость-лед (выражается зависимостью от T); $k(T, x)$ – коэффициент теплопроводности, с разрывами, аналогичными $\lambda(T, x)$; R – удельная теплота фазового перехода жидкость-лед; $\delta(T - T_{\text{л}})$ – дельта-функция; $T_{\text{л}}$ – температура фазового перехода; $Q_0(\tau)$ – среднее значение лучистой энергии, падающей на поверхность водоема.

Уравнение (21) дополняется граничными условиям:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = 0, \quad (22)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T - T_A(\tau)) \quad \text{при } x = h_{\Gamma} + H, \quad (23)$$

где h_{Γ} – толщина слоя грязи; H – глубина водоема; k – коэффициент теплопроводности рапы; α – коэффициент теплообмена водоема с атмосферой; $T_A(\tau)$ – температура воздуха (атмосферы). В результате получается теплоизолированную нижнюю границу (22) и теплообмен по закону (23) на поверхности.

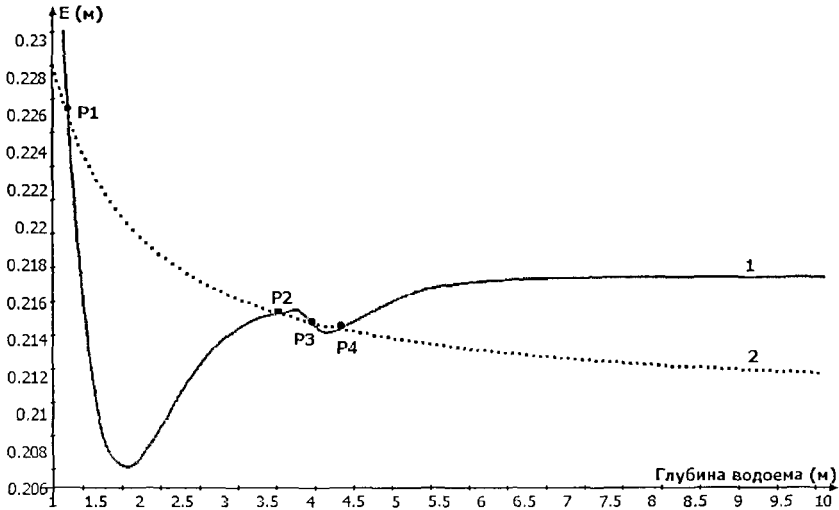


Рисунок 5. Функция $E(H)$ – линия 1, функция $q/S(H)$ – линия 2.

Решение задачи (21) – (23) находилось численными методами, в предположении, что

$$T_A(\tau) = T_{CP} + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{P} \tau\right), \quad (24)$$

где T_{CP} – средняя температура воздуха; A – амплитуда колебаний температуры; P – исследуемый период колебаний, принимался равным 12 месяцев.

Условия (23), (24) приводились к колебаниям температуры рапы, которые не только отставали по фазе от (24), но имели меньшую амплитуду, зависящую, в свою очередь, от глубины водоема H .

Подставляя значения $T(h_r + H, \tau)$ последовательно в (20) и (19), получили функцию $E(H)$, график которой представлен на рисунке 5.

Далее переходим непосредственно к исследованию уравнения (18) – необходимо найти стационарные точки процесса и определить их устойчивость. Метод нахождения стационарных точек иллюстрируется рисунком 5 – они (точки) определяются пересечением кривых $E(H)$ и $q/S(H)$. На рисунке 5 – это P1, P2, P3, P4.

Для определения устойчивости воспользовались следующим рассуждением. Так как в уравнении (18) $q/S(H)$ задает поступление воды в озеро, а $E(H)$ – расход, то, очевидно, что устойчивый уровень водоема будет определяться условием

$$\frac{d\left(\frac{q}{S(H)}\right)}{dH} < \frac{dE(H)}{dH} \quad (25)$$

Проверяем выполнение (25) в стационарных точках и получаем заключение об их устойчивости.

Так как в (18) имеется управляющий параметр q – количество воды, поступающей в озеро (параметр, которым действительно можно управлять), необходимо решить вопрос о поведении стационарных точек в зависимости от значения q . Результат представлен на рисунке 6.

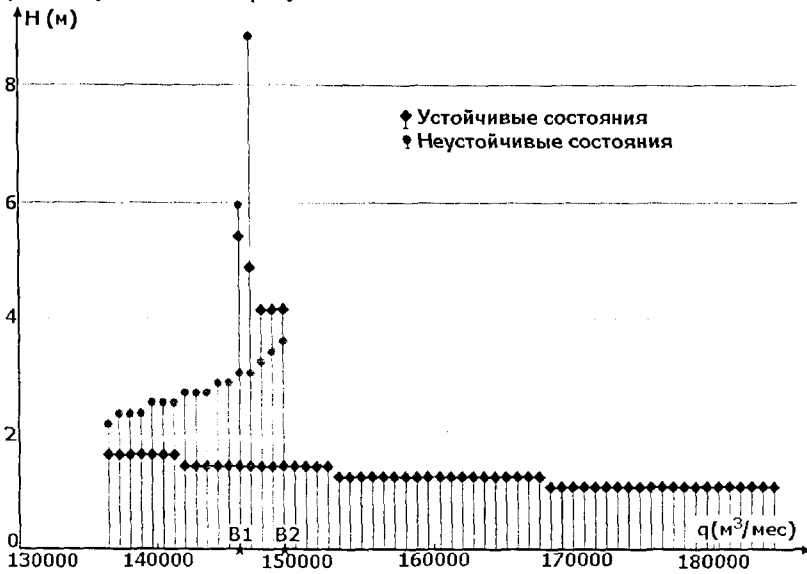


Рисунок 6. Зависимость стационарных точек от управляющего параметра.

На рисунке 6 имеем две точки бифуркации – B1, B2 – в которых существенным образом меняется поведение стационарных решений. Принципиально важным является наличие в области [B1; B2] устойчивой стационарной точки при уровне водосма от 4 до 6 м – это именно те значения глубины, около которых в настоящий момент произошла стабилизация уровня Тамбуканского озера. Стационарные решения при глубине меньше 2 м практического значения не имеют, так как в этих случаях происходит существенное увеличение минерализации, приводящее даже к стерилизации водосма. Тем не менее, в истории наблюдений за озером (уровень которого опускался и ниже отметки 1 м) отмечен период стабилизации уровня рапы на отметке 1-1.6 м, когда и было принято решение о начале мероприятий по его (озера) искусственному обводнению, что в результате привело к нынешнему состоянию.

Наличие (в общем случае) двух устойчивых состояний, одно из которых (глубина H_1) существует при любых значениях параметра q и не очень благоприятно для биоценоза грязевого месторождения, приводит к необходимости решать следующую задачу управления – как следует изменить параметр q (каким должен быть дополнительный приток воды), чтобы перевести систему во второе устойчивое состояние (глубина H_2). Воспользовавшись уравнением (18), получим

$$\tau = \int_{H_1}^{H_2} \frac{S(H)}{q + \Delta q - E(H) \cdot S(H)} dH, \quad (26)$$

или, если учесть, что уровни H_1 и H_2 разделены стационарным неустойчивым состоянием H^* :

$$\Delta q = \frac{H_2 - H_1}{\tau} S(H^*), \quad (27)$$

где τ – время перехода; Δq – изменение управляющего параметра (поступления воды), собственно переводящее систему из одного устойчивого состояния в другое за время τ .

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем.

1. Впервые разработаны математические модели процесса массообмена в грязевом месторождении с постоянным и переменным уровнем рапы, которые позволяют использовать аналитические методы оценки состояния природных экосистем.

2. Исследованы и обоснованы границы (области) применимости разных видов моделей – в зависимости от задач, которые предполагается решить с их помощью.

3. Установлено наличие в рапе пространственно-временной области, называемой безградиентной (БГ) зоной, ниже которой может наблюдаться кратковременное увеличение концентрации исследуемых веществ, а внутри минерализация остается постоянной. Предложены алгоритмы для выявления такой зоны.

4. Предложены способы отбора проб рапы, которые позволяют, во-первых, иметь более объективные данные о текущем состоянии водоема, во-вторых, получить краткосрочный прогноз изменения минерализации.

5. Установлено, что наличие турбулентной диффузии в рапе не может рассматриваться в качестве фактора, уничтожающего концентрационную стратификацию.

6. Обнаружено, что в условиях, когда минерализация на поверхности водоема меньше, чем во всем грязевом месторождении:

- минерализация лечебной грязи убывает и практически не зависит от процессов, происходящих в рапе;
- возможно существование положительной связи между уровнем рапы и ее минерализацией.

7. Обосновано наличие состояний равновесия уровня рапы, что не только позволяет прогнозировать ее (рапы) уровень, но и обоснованно управлять поверхностным стоком в целях обеспечения его (уровня) требуемых значений.

8. На основе системного анализа исследуемых процессов разработаны:

- методика расчета зон массообмена на месторождении лечебной грязи;
- методика контроля и прогнозирования величины минерализации различных компонентов грязевого месторождения;

– методика отбора проб рапы на месторождении лечебной грязи;

9. Разработан комплекс программных средств для исследования и прогнозирования изменения основных количественных и качественных характеристик массообмена в рассматриваемом объекте – грязевом месторождении;

Публикации по теме диссертационной работы

1. Рощина Т.К. Тепло-массообменные явления в соленых водоемах грязевых месторождений / Т.К. Рощина, В.Г. Ушаков // Научная мысль Кавказа. – 1999. – №1. – С. 50.
2. Рощина Т.К. Математическая модель тепло-массообменных явлений в соленых водоемах / Т.К. Рощина, В.Г. Ушаков // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ 12: сб. тр. Междунар. науч. конф. / Новгор. гос. ун-т. – Новгород, 1999. – Т.2. – С. 101-103.
3. Рощина Т.К. Влияние опреснения Тамбуканского озера на минерализацию лечебной грязи / Т.К. Рощина, В.Г. Ушаков // Актуальные вопросы курортной науки в России: материалы науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию ГНИИК. – Пятигорск, 1999. – С. 52-53.
4. Рощина Т.К. Технология и аппараты для проведения грязевых процедур во вне курортных условиях / Т.К. Рощина, В.Г. Ушаков, Р.Е. Муравлева // 30 лет Северо-Кавказскому научному центру высшей школы: IV Объедин. науч. сессия: материалы сессии / Сев.-Кавк. науч. центр ВШ. – Ростов н/Д, 1999. – С.7-8.
5. Рощина Т.К. Влияние опреснения проточного водоема грязевого месторождения на минерализацию пелонда / Т.К. Рощина // Актуальные вопросы курортной науки в России: материалы юбил. науч.-практ. конф. – Пятигорск, 2000. – Ч.1. – С. 49-51.
6. Рощина Т.К. Основные принципы организации грязелечения по месту проживания больных во вне курортных условиях / Т.К. Рощина, В.Г. Ушаков, Р.Е. Муравлева // Актуальные вопросы курортной науки в России: материалы юбил. науч.-практ. конф. – Пятигорск, 2000. – Ч.1. – С. 58-59.
7. Рощина Т.К. Массообменные явления в соленых водоемах грязевых месторождений / Т.К. Рощина, В.Г. Ушаков // Разработка научных основ и способов ресурсосберегающей и экологически чистой технологии добычи полезных ископаемых: материалы XXXXVI науч.-техн. конф. ЮРГТУ (НПИ). – Новочеркасск, 1999. – С. 33-36.
8. Рощина Т.К. Оценка конвективной составляющей при диффузионном переносе вещества / Т.К. Рощина, В.Г. Ушаков // Разработка научных основ и способов ресурсосберегающей и экологически чистой технологии добычи полезных ископаемых: материалы XXXXIX науч.-техн. конф. ЮРГТУ (НПИ). – Новочеркасск: Изд-во НОК, 2000. – С. 91-92.
9. Рощина Т.К. К определению границ зоны концентрационной стратификации в рапе грязевого водоема / Т.К. Рощина, В.Г. Ушаков // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2000: сб. тр. 13 Междунар. науч. конф. / Санкт-Петербург. гос. технол. ин-т (ун-т). – СПб., 2000. – Т.3. – С. 59-60.
10. Рощина Т.К. О регулярном режиме молекулярной диффузии при опреснении водоема грязевого месторождения / Т.К. Рощина, В.Г. Ушаков // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2000: сб. тр. 13 Междунар. науч. конф. / Санкт-Петербург. гос. технол. ин-т (ун-т). – СПб., 2000. – Т.3. – С. 64-65.

11. Рощина Т.К. Теория мониторинга грязевого месторождения и приборы для его осуществления / Т.К. Рощина, В.Г. Ушаков // Теория, методы и средства контроля и диагностики: материалы Междунар. науч. конф.: в 10-ти ч. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000. – Ч.6. – С. 25-26.
12. Рощина Т.К. Управление исследованием нестационарного концентрационного поля грязевого месторождения / Т.К.Рощина // Тез. докл. регион. науч.- техн. конф. "Управление в технических, социально-экономических и медико-биологических системах" // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.– 2000.– № 4. – С. 126.
13. Рощина Т.К. Основные закономерности массообменных явлений на месторождении лечебной грязи / Т.К. Рощина // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2001. – № 4. – С. 108-109.
14. Рощина Т.К. Моделирование и численные методы решения сопряженных задач нестационарного массообмена / Т.К. Рощина, В.Г. Ушаков // Теплофизические измерения в начале XXI века: IV Междунар. теплофизическая школа. - Тамбов: ТГТУ, 2001. – Ч.1. – С. 48-50.
15. Рощина Т.К. Методы решения эволюционных задач массообмена / Т.К. Рощина // Теплофизические измерения в начале XXI века: IV Междунар. теплофизическая школа. – Тамбов: ТГТУ, 2001. – Ч.1.– С. 122-123.
16. Рощина Т.К. Математическое описание нестационарного концентрационного поля грязевого месторождения / Т.К. Рощина // Математические методы в технике и технологиях ММТТ–15: сб. тр. XV Междунар. науч. конф.: в 10-ти т. – Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2002. – Т.2. – С. 137-139.
17. Рощина Т.К. Использование математической модели для управления концентрацией вещества в грязевом месторождении / Т.К. Рощина // Математические методы в технике и технологиях: ММТТ – Дон 2003: сб. тр. Междунар. науч. конф. – Ростов н/Д, 2003. – Т.2. – С. 132-133.
18. Рощина Т.К. Математическое моделирование процесса массопереноса в слоях грязевого месторождения / Т.К. Рощина, Ю.Я. Герасименко // Автоматизация технологичних об'єктів та процесів. Пошук молодих: VI Міждунар. наук.-техн. конф. – Донецк. 2006. – С. 18-20.
19. Рощина Т.К. Математическое моделирование пространственно-временного распределения концентрации вещества в грязевом месторождении/ Т.К. Рощина, Ю.Я. Герасименко // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2006. – № 5. – С. 35-39.
20. Рощина Т.К. Математическое моделирование процесса массопереноса в грязевом месторождении в стационарном режиме / Т.К. Рощина, Ю.Я. Герасименко // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2006. – № 6. – С. 19-22.

РОЩИНА Татьяна Константиновна

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ
МИНЕРАЛИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЛЕЧЕБНЫХ ГРЯЗЕЙ**

Подписано в печать 26.09.2009 г.

Формат 60x90 1/16. Уч. печ. л. 1,39. Тираж 50 экз. Заказ № 325.
Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Центр оперативной полиграфии ЮРГТУ (НПИ)
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, тел. 255-305