

И.А. Бондин**МЕТОДИКА КУСОЧНОЙ АППРОКСИМАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОЛИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОГО
ЗАЛЕГАНИЯ**

Рассматривается задача описания статических характеристик гидролитосферных процессов в глубокозалегающих водоносных горизонтах на примере Эссентукского месторождения минеральных подземных вод, относящегося к IV категории сложности по действующей классификации. Показано, что классические методы аппроксимации распределённых звеньев, широко применяемые при исследовании и проектировании систем управления для верхних водоносных горизонтов глубиной 50–400 м, оказываются непригодными для условий глубокого залегания. Это связано с высокой газонасыщенностью вод, выраженной структурной неоднородностью коллекторов, сложной и нередко нелинейной гидравлической связью между эксплуатационными и наблюдательными скважинами, а также пространственно-временной изменчивостью гидрохимических параметров. Предложена модифицированная методика кусочной аппроксимации статических характеристик гидролитосферных процессов, основанная на раздельном определении параметров аппроксимирующих звеньев на отдельных интервалах расстояний между скважинами по результатам опытно-фильтрационных работ. Методика апробирована для Сеноман–Маастрихтского водоносного горизонта Новоблагодарненского участка Эссентукского месторождения, для которого рассчитаны коэффициенты гидравлического взаимодействия скважин и построены статические передаточные функции для различных пространственных интервалов с учётом реальных геолого-фильтрационных условий. Показано, что использование кусочной аппроксимации обеспечивает более согласованное с экспериментальными данными описание статических характеристик по сравнению с однородными моделями и позволяет учитывать пространственную изменчивость фильтрационных свойств среды. Полученные результаты формируют методическую основу для прогнозирования гидродинамических и газогидрохимических изменений, оценки устойчивости эксплуатационных режимов, а также для разработки и синтеза систем управления дебитами глубоких скважин минеральных подземных вод. Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенной методики при обосновании параметров опытно-промышленной эксплуатации, корректировке проектных решений, интерпретации данных режимных наблюдений и опытно-фильтрационных работ, а также при формировании научно обоснованных рекомендаций по управлению водоотбором, снижению техногенных возмущений и сохранению устойчивости гидролитосферных систем в условиях интенсивного освоения месторождений.

Гидролитосферные процессы; минеральные подземные воды; Эссентукское месторождение; Сеноман–Маастрихтский водоносный горизонт; опытно-фильтрационные работы; коэффициент гидравлического взаимодействия; кусочная аппроксимация.

I.A. Bondin**THE METHOD OF PIECEWISE APPROXIMATION OF STATIC
CHARACTERISTICS OF DEEP-LYING HYDROLITHOSPHERIC PROCESSES**

This paper addresses the problem of describing the static characteristics of hydrolithospheric processes in deep-lying aquifers using the Essentuki mineral groundwater field, classified as a Category IV deposit in terms of geological complexity, as a case study. It is shown that classical methods for approximating distributed transfer functions, widely applied in the analysis and design of control systems for shallow aquifers at depths of 50–400 m, are not applicable to deep-lying conditions. This limitation is caused by high gas saturation of groundwater, pronounced structural heterogeneity of reservoirs, complex and often nonlinear hydraulic interaction between production and observation wells, as well as spatial and temporal variability of hydrochemical parameters. A modified method of piecewise approximation of static characteristics of hydrolithospheric processes is proposed. The method is based on the separate identification of parameters of approximating elements over individual distance intervals between wells using the results of pumping tests. The approach was implemented for the Cenomanian–Maastrichtian aquifer of the Novoblagodarnensky area of the Essentuki field, where hydraulic interaction coefficients between wells were calculated and static transfer functions were constructed for different spatial intervals, taking into account actual geological and filtration conditions. The results demonstrate that the use of piecewise approximation provides a better agreement with experimental data compared to homogeneous models and allows spatial variability of filtration properties to be taken into account. The obtained results form a methodological basis for forecasting hydrodynamic and gas–hydrochemical changes, assessing the stability of operating regimes, and developing and synthesizing control systems for regulating discharge rates

of deep mineral groundwater wells. The practical significance of the study lies in the applicability of the proposed method to substantiating pilot industrial operation parameters, adjusting design solutions, interpreting monitoring and pumping test data, and formulating scientifically grounded recommendations for groundwater abstraction management, reduction of technogenic disturbances, and preservation of the stability of hydrolithospheric systems under conditions of intensive field development.

Hydrolithospheric processes; mineral groundwater; Essentuki field; Cenomanian–Maastrichtian aquifer; pumping tests; hydraulic interaction coefficient; piecewise approximation.

Введение. Объект исследования расположен на юге Европейской части России, в центральной части Предкавказья, в пределах региона Кавказские Минеральные Воды (КМВ) Ставропольского края. Район КМВ является старейшим курортным регионом России и обладает уникальной гидроминеральной базой, включающей 24 месторождения и участка минеральных подземных вод [1, 2]. Особое значение имеют углекислые воды хлоридно-гидрокарбонатного натриевого состава типов «Ессентуки № 4» и «Ессентуки № 17», развитые в дат–зеландском и сеноман–маастрихтском водоносных горизонтах [2–4].

В связи с развитием курортной инфраструктуры и ростом потребности в минеральных водах усиливается освоение водоносных горизонтов более глубокого залегания. Это сопровождается проявлением новых для региона факторов: высокого газового насыщения, сложной (часто незакономерной) гидравлической связи между скважинами, изменения гидрохимических характеристик. Эти особенности фиксируются, в частности, по результатам опытно-фильтрационных работ (ОФР) на Новоблагодарненском участке Ессентукского месторождения.

Согласно действующей классификации запасов минеральных подземных вод [Классификация..., приказ Минприроды России № 195], месторождения КМВ отнесены к IV категории сложности, что накладывает ограничения на использование математического аппарата при исследовании гидролитосферных процессов и требует применения плоских моделей в цилиндрических координатах [5–11].

Цель работы – разработать модифицированную методику кусочной аппроксимации статических характеристик гидролитосферных процессов в глубокозалегających водоносных горизонтах по результатам ОФР, обеспечивающую более адекватное описание гидравлического взаимодействия скважин в условиях структурной неоднородности.

Новизна работы. Впервые предложена модифицированная методика кусочной аппроксимации статических, а в дальнейшем и динамических характеристик гидролитосферных процессов, позволяющая:

1. Описать статическую передаточную функцию гидролитосферного процесса в горизонтах глубокого залегания, где известные ранее методы описания (уравнениями в частных производных, уравнениями, использующими цилиндрические координаты и др. [8]) не применимы.

2. Учитывать неоднородности среды и пространственную изменчивость параметров, что невозможно в рамках классических моделей [8].

3. По результатам ОФР при ограниченном числе наблюдательных скважин, удается описать взаимодействия скважин, расположенных в рассматриваемом горизонте глубокого залегания и построить модели, позволяющие прогнозировать развития гидролитосферных процессов на близкую и дальнюю перспективы (изменение гидродинамических процессов и газогеохимических составов добываемого гидроминерального сырья).

Материалы и методы. Исследования выполнены на Новоблагодарненском участке Ессентукского месторождения углекислых минеральных вод, приуроченном к сеноман–маастрихтскому водоносному горизонту. Расположение эксплуатационных и наблюдательных скважин (1-бис-Э, 2-бис-Э, 49-Э, 46-Э) приведено на схеме (рис. 1).

По результатам ОФР получены понижения уровня в наблюдательных скважинах (табл. 1), на основании которых вычислены статические коэффициенты передачи:

$$K_i = \frac{\Delta h_i}{Q}, i = 1, \dots, 4. \quad (1)$$

где Δh_i – понижение уровня в i -й скважине, при дебите скважины № 1-бис-Э; $Q = 65 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Таблица 1

Параметры исследования Сеноман-Маастрихтского водоносного горизонта

Дебит скв. №1-бис-Э (м ³ /сут.)	Понижение уровня в скв. № 1-бис-Э (м.)	Понижение уровня в скв. № 2-бис-Э (м.)	Понижение уровня в скв. № 49-Э (м.)	Понижение уровня в скв. № 46-бис (м.)
65	45	12	7	10
Статические коэффициенты передачи				
	$K_1=45/65=0.6923$	$K_2=12/65=0.1846$	$K_3=7/65=0.1077$	$K_4=10/65=0.1538$

Базовая математическая модель. Для описания статических характеристик гидролитосферных процессов используется аппроксимирующее распределённое звено с сосредоточенным управляющим воздействием [8, 11, 12] (статический коэффициент передачи, учитывающий различные коэффициенты фильтрации по пространственным координатам):

$$W(x, y) = \frac{K}{\beta} \cdot \exp\left(-\beta \cdot (x^2 + (K_n \cdot y)^2)^{0.5}\right); \beta = (D)^{1/2}, \quad (2)$$

где $W(x, y)$ – статический коэффициент гидравлического взаимодействия скважин, определяемый с использованием ОФР; x, y – пространственные координаты; D, K – определяемые параметры K_n – добавочный параметр, учитывающий различные коэффициенты фильтрации по пространственным координатам (x, y) [8].

Рассмотрим определение параметров для Новоблагодарненского участка, расположение скважин которого показано на рис. 1

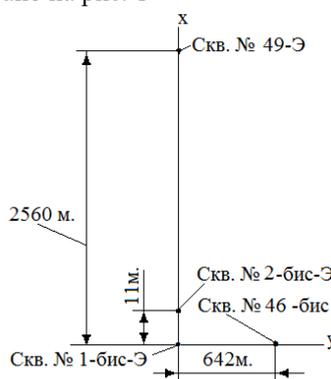


Рис. 1. Расположение скважин рассматриваемого участка

Параметры исследования рассматриваемого продуктивного Сеноман-Маастрихтского водоносного горизонта, полученные в результате ОФР, приведены в табл. 1.

На рис. 2 приведены варианты расчетов параметров звеньев, аппроксимирующих статические характеристики гидролитосферных процессов.

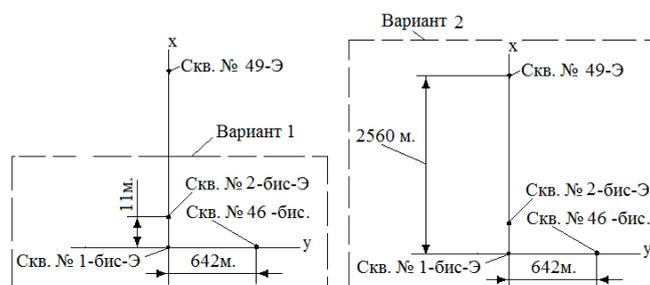


Рис. 2. Варианты расчетов параметров звеньев

Определим коэффициенты гидравлического взаимодействия скважин для первого варианта расчетов.

Приравнивая статические коэффициенты усиления аппроксимирующего звена (полагая $s=0$, радиус депрессионной воронки $r_0=0.2$ м, данный радиус обусловлен конструктивными и геолого-фильтрационными особенностями глубоких эксплуатационных скважин Эссентукского месторождения. В отличие от неглубоких водозаборов, где фильтровая колонна задаёт фиксированный радиус зоны начала линейной фильтрации, глубокие скважины Сенман–Маастрихтского горизонта вскрывают продуктивные породы по открытому стволу (диаметр 165 мм). Фильтровые колонны в их конструкции отсутствуют вследствие высокой крепости карбонатных пород. При длительной и интенсивной эксплуатации происходит вымывание мелких фракций в зонах активного водопритока, что приводит к формированию вокруг ствола расширенной кавернозной зоны. По данным геофизических исследований (кавернометрия), радиус этой «кавернозной» зоны составляет порядка 0,18–0,22 м. В практической гидродинамике для таких условий используется усреднённое значение $r_0=0,2$ м (эффективный радиус зоны) начиная с которой восстанавливается линейная зависимость «дебит–депрессия» и становятся корректными предпосылки классической теории фильтрации. Следует подчеркнуть, что указанное допущение применимо исключительно к совершенным скважинам, полностью вскрывающим пласт от кровли до подошвы, обеспечивающим равномерный приток по всей мощности водоносного горизонта. В таких условиях эффективный радиус r_0 отражает не конструктивные элементы скважины, а фактические геолого-фильтрационные свойства «кавернозной» зоны, сформированной вокруг открытого ствола. Приравнивая статические коэффициенты гидравлического взаимодействия скважин значениям K_1 и K_2 , K_3 (см. табл. 1), и полагая, что $L_1-r_0 \approx L_1$; $L_2-r_0 \approx L_2$, ($L_1=11$ м.; $L_2=642$ м.) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \\ K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \\ K_3 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot K_n \cdot L_2), \beta = (D)^{1/2} \end{cases} \quad (3)$$

где D , K и K_n – определяемые параметры [8].

Подставляя в (3) вычисленные значения коэффициентов передачи (см. табл. 1), получим:

$$\begin{cases} 0.6923 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 0.2), \\ 0.1846 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 11), \\ 0.1538 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot K_n \cdot 642), \beta = (D)^{1/2} \end{cases} \quad (4)$$

Решая полученную систему, приходим к следующему результату:

$$D=0.01498, K=0.086831, K_n=0.019457. \quad (5)$$

Коэффициент статического взаимодействия скважин записывается в виде:

$$W = \frac{0.086831}{\beta} \cdot \exp\left(-\beta \cdot (x^2 + (0.019457 \cdot y)^2)^{0.5}\right) \quad \beta = (0.01498)^{1/2}. \quad (6)$$

По результатам расчетов построены графики, приведенные на рис. 2, 3

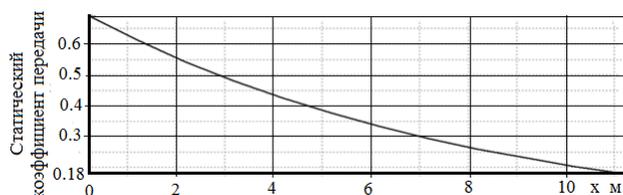


Рис. 3. График изменения статического коэффициента передачи, при изменении $0 \leq x \leq 11$ м

Рассмотрим второй вариант расчетов ($L_1=2560$ м.; $L_2=642$ м.). Подставляя вычисленные значения, получим:

$$\begin{cases} 0.6923 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 0.2), \\ 0.11077 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 2560), \\ 0.1538 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot K_p \cdot 642), \beta = (D)^{1/2} \end{cases} \quad (7)$$

Решая полученную систему численным методом, придем к следующему результату:

$$D=0.00000053, K= 0.00050329, K_p=3.22401659.$$

Статический коэффициент гидравлического взаимодействия скважин рассматриваемого объекта записывается в виде:

$$W = \frac{0.00050329}{\beta} \cdot \exp\left(-\beta \cdot (x^2 + (3.22401659 \cdot y)^2)^{0.5}\right); \quad (8)$$

$$\beta = (0.00000053)^{1/2}.$$

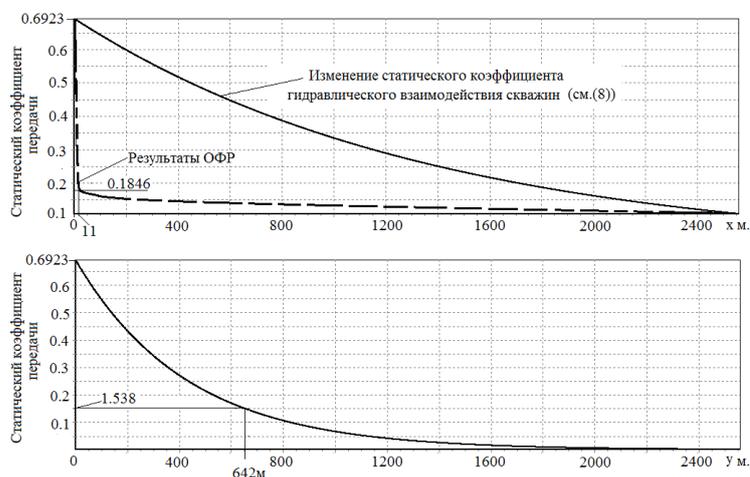


Рис. 4. Графики статических коэффициентов передачи при изменении $0 < x \leq 2560$, $0 < y \leq 2560$

Обсуждение. При описании гидролитосферных процессов в пластах глубокого залегания, методика вычисления параметров аппроксимирующих звеньев (хорошо зарекомендовавшая при исследовании и проектировании систем управления гидрорлитосферными процессами верхних горизонтов (50-400м.)), не может быть использована, при описании гидролитосферных процессов глубокого залегания. На рис. 4 приведены графики

изменения статического коэффициента гидравлического взаимодействия скважин, построенные, с использованием методики, применяемой для верхних горизонтов и с использованием опытно-фильтрационных работ.

При проведении ОФР, вычисление коэффициента передачи по координате x осуществлялось с использованием результатов измерений параметров гидролитосферного процесса в трех скважинах (см. рис. 1).

Для описания гидролитосферных процессов в пластах глубокого залегания, рассмотрим методику **кусочной аппроксимации** статических характеристик гидролитосферных процессов.

Модифицируем методику, приведенную в [11], при этом будем использовать кусочную аппроксимацию статических характеристик на рассматриваемых интервалах ($0 < x \leq 11$, $11 < x \leq 2560$).

Рассматриваемая методика распадается на следующие этапы:

1. Вычисление параметров аппроксимирующего звена для первого интервала ($r_0 \leq x \leq L_2$). Приравняв статические коэффициенты усиления аппроксимирующего звена (полагая, радиус депрессионной воронки $r_0 = 0.2$ м.) значениям K_1 и K_2 , и полагая, что $L_1 = 11$ м. получим систему уравнений:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \\ K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \end{cases} \quad (9)$$

$$\beta = (D)^{1/2}.$$

Решая которую, определим значения параметров $D_1 = D$ и $K_1 = K$ на первом интервале ($r_0 \leq x \leq L_1$).

Подставляя исходные данные, получим:

$$\begin{cases} 0.6923 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \\ 0.1846 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \end{cases}$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2}, \quad (10)$$

$$K = 1.32182$$

Статический коэффициент передачи аппроксимирующего звена на первом интервале записывается в виде:

$$W_a = \frac{1.32182}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x^2); \quad (11)$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2}.$$

2. Вычисление параметров аппроксимирующего звена для второго интервала ($L_1 \leq x \leq L_2$).

$$\begin{cases} K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \\ K_3 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_2), \end{cases} \quad (12)$$

$$\beta = (D)^{1/2}.$$

Подставляя исходные данные и решая полученную систему, определим значения параметров на втором интервале ($L_1 \leq x \leq L_2$).

$$\begin{cases} 0.1856 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \\ 0.1077 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_2), \end{cases}$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2}, \quad (13)$$

$$K = 0.00003911$$

Статический коэффициент передачи аппроксимирующего звена на втором интервале записывается в виде:

$$W_a = \frac{0.00003911}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x^2); \quad (14)$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2}.$$

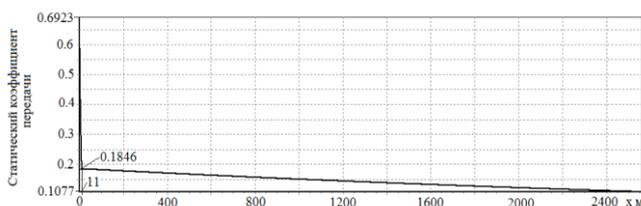


Рис. 5. График статического коэффициента передачи, полученный с использованием методики кусочной аппроксимации

Полученный график статического коэффициента передачи (см. рис. 5), совпадает с графиком, приведенным на рис. 4, построенным с использованием результатов ОФР.

Заключение. Рассматриваемые горизонты глубокого залегания относятся к IV категории сложности месторождений минеральных подземных вод, и как показывают исследования, известные методы описание статических и динамических характеристик, а также изменение уровней минерализации рассматриваемых гидrolитосферных процессов (в виде уравнений в частных производных), а также распределенных аппроксимирующих звеньев [13–15] не применимы для рассматриваемых горизонтов. В результате проведения опытно-фильтрационных работ могут быть определены параметры исследуемых процессов на отдельных участках (изменение уровней, изменение химического состояния добываемого гидроминерального сырья, динамика распространения возмущающих воздействий от добывающих скважин, и др.) [16–20]. Для оценки возможности эксплуатации рассматриваемых месторождений и построения систем управления дебитами добывающих скважин была разработана методика кусочной аппроксимации статических характеристик гидrolитосферных процессов глубокого залегания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондин И.А., Снурницын Г.К. Автоматизация системы управления добычи и мониторинга скважин Ессентукского месторождения минеральных подземных вод // Геология и недропользование. – 2023. – № 3. – С. 159-165.
2. Першин И.М., Помеляйко И.С. Системный анализ экологического состояния зоны гипергенеза курорта Кисловодск // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2013. – № 3 (36). – С. 74-80.
3. Бондин И.А. Системный анализ гидrolитосферных процессов Ессентукского месторождения минеральных подземных вод (Новоблагодарненский участок) // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2025. – № 2. – С. 5-15.
4. Бондин И.А., Снурницын Г.К. Системный анализ процессов в гидrolитосфере Ессентукского месторождения минеральных подземных вод // XII Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика»: Сб. материалов конференции. – 2024. – С. 224-230.
5. Малков А.В., Першин И.М. Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидrolитосферными процессами: монография. – М.: Научный мир, 2007. – 252 с.

6. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами: анализ и синтез: монография. – М.: Научный мир, 2012. – 472 с.
7. Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С. Анализ экологического состояния гидроминеральной базы курорта Кисловодск // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2016. – № 1. – С. 12-22.
8. Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С., Уткин В.А., Королев Б.И., Дубогрей В.Ф., Хмель В.В., Першин М.И. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод: системный анализ, диагностика, прогноз, управление: монография. – М.: Наука, 2015. – 283 с.
9. Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 126-138.
10. Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Методы аппроксимации передаточных функций распределенных объектов // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. научных трудов VII Всероссийской научной конференции. – 2015. – С. 106-117.
11. Першин И.М., Носова В.А., Русак С.Н. Определение параметров распределенных звеньев, аппроксимирующих гидролитосферные процессы // Современная наука и инновации. Научный журнал. – 2021. – Вып. № 2 (34). – С. 10-16.
12. Першин И.М., Малков А.В., Криштал В.А. Построение системы управления параметрами эксплуатации системы добычи минеральной воды в регионе КМВ // Современная наука и инновации. – 2013. – № 1 (1). – С. 17-23.
13. Kukharova T.V., Pershin I.M., Utkin V.A. Modeling of a decision support system for a psychiatrist based on the dynamics of electrical conductivity parameters // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. – 2021. – P. 975-978.
14. Makarova A.A., Kaliberda I.V., Pershin I.M., Kovalev D.A. Modeling a production well flow control system using the example of the verkhneberezovskaya area // Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022. – 2022. – P. 760-764.
15. Pershin I.M., Papush E.G., Malkov A.V., Kukharova T.V., Spivak A.O. Operational control of underground water exploitation regimes // Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019. – 2019. – P. 77-80.
16. Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – 87. – 032029. – P 1-7. – doi: 10.1088/1755-1315/87/3/032029 (skop).
17. Kukharova T.V., Pershin I.M., Malkov A.V. The Study of Periodic Effects on Parameters of Hydrolytospheric Processes // 2019 International Science and Technology Conference “EastConf”. – 2019. – P. 7.
18. Першин И.М., Кузьмин Н.Н., Малков А.В. Формирование целевых функций в задачах управления гидролитосферными процессами // 5-я Российская мультиконференция по проблемам управления: Сб. материалов конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2012). – 2012. – С. 622-632.
19. Drovosekova T.I., Pershin I.M. Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of kavkazskiye mineralnye vody (caucasus mineral springs) // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. – 2016. – P. 215-217.
20. Asadulagi M.A.M., Pershin I.M., Tsapleva V.V. Research on Hydrolithospheric processes using the results of groundwater inflow testing // Water. – 2024. – Vol. 16, No. 3. – P. 487.

REFERENCES

1. Bondin I.A., Snurnitsyn G.K. Avtomatizatsiya sistemy upravleniya dobychi i monitoringa skvazhin Essentukskogo mestorozhdeniya mineral'nykh podzemnykh vod [Automation of the control system for extraction and monitoring of wells at the Essentuki mineral groundwater field], *Geologiya i nedropol'zovanie* [Geology and Subsoil Use], 2023, No. 3, pp. 159-165.
2. Pershin I.M., Pomelyayko I.S. Sistemnyy analiz ekologicheskogo sostoyaniya zony gipergenezы kurorta Kislovodsk [System analysis of the ecological state of the hypergenesis zone of the Kislovodsk resort], *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the North-Caucasus Federal University], 2013, No. 3 (36), pp. 74-80.
3. Bondin I.A. Sistemnyy analiz gidrolitosfernykh protsessov Essentukskogo mestorozhdeniya mineral'nykh podzemnykh vod (Novoblagodarnenskiy uchastok) [System analysis of hydrolithospheric processes of the Essentuki mineral groundwater field (Novoblagodarnensky area)], *Vestnik Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna* [Bulletin of Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design], 2025, No. 2, pp. 5-15.
4. Bondin I.A., Snurnitsyn G.K. Sistemnyy analiz protsessov v gidrolitosfere Essentukskogo mestorozhdeniya mineral'nykh podzemnykh vod [System analysis of hydrolithospheric processes of the Essentuki mineral groundwater field], *XII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika»: Sб. materialov konferentsii* [XII All-Russian Scientific Conference “System Synthesis and Applied Synergetics”: Conference Proceeding], 2024, pp. 224-230.

5. *Malkov A.V., Pershin I.M.* Sintez raspredelennykh regulyatorov dlya sistem upravleniya gidrolitosfernymi protsessami: monografiya [Synthesis of distributed controllers for hydrolithospheric process control systems: monograph]. Moscow: Nauchnyy mir, 2007, 252 p.
6. *Malkov A.V., Pershin I.M.* Sistemy s raspredelennymi parametrami analiz i sintez: monografiya [Distributed parameter systems: analysis and synthesis: monograph]. Moscow: Nauchnyy mir, 2012, 472 p.
7. *Malkov A.V., Pershin I.M., Pomelyayko I.S.* Analiz ekologicheskogo sostoyaniya gidromineral'noy bazy kurorta Kislovodsk [Analysis of the ecological state of the hydromineral resource base of the Kislovodsk resort], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration], 2016, No. 1, pp. 12-22.
8. *Malkov A.V., Pershin I.M., Pomelyayko I.S., Utkin V.A., Korolev B.I., Dubogrey V.F., Khmel' V.V., Pershin M.I.* Kislovodskoe mestorozhdenie uglekislykh mineral'nykh vod: sistemnyy analiz, diagnostika, prognoz, upravlenie: monografiya [Kislovodsk carbonated mineral water field: system analysis, diagnostics, forecasting, and control: monograph]. Moscow: Nauka, 2015, 283 p.
9. *Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I.* Approksimatsionnye modeli peredatochnykh funktsiy raspredelennykh ob'ektov [Approximation models of transfer functions of distributed objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 126-138.
10. *Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I.* Metody approksimatsii peredatochnykh funktsiy raspredelennykh ob'ektov [Methods for approximating transfer functions of distributed objects. in: system synthesis and applied synergetics], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. nauchnykh trudov VII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [System Synthesis and Applied Synergetics: Proceedings of the VII All-Russian Scientific Conference], 2015, pp. 106-117.
11. *Pershin I.M., Nosova V.A., Rusak S.N.* Opredelenie parametrov raspredelennykh zven'ev, approksimiruyushchikh gidrolitosfernye protsessy [Determination of parameters of distributed elements approximating hydrolithospheric processes], *Sovremennaya nauka i innovatsii. Nauchnyy zhurnal* [Modern Science and Innovations], 2021, Issue No. 2 (34), pp. 10-16.
12. *Pershin I.M., Malkov A.V., Krishtal V.A.* Postroenie sistemy upravleniya parametrami ekspluatatsii sistemy dobychi mineral'noy vody v regione KMV [Development of a control system for operational parameters of mineral water extraction in the Caucasian Mineral Waters region], *Sovremennaya nauka i innovatsii* [Modern Science and Innovations], 2013, No. 1 (1), pp. 17-23.
13. *Kukharova T.V., Pershin I.M., Utkin V.A.* Modeling of a decision support system for a psychiatrist based on the dynamics of electrical conductivity parameters, *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021*, 2021, pp. 975-978.
14. *Makarova A.A., Kaliberda I.V., Pershin I.M., Kovalev D.A.* Modeling a production well flow control system using the example of the verkhneberezhovskaya area, *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022*, 2022, pp. 760-764.
15. *Pershin I.M., Papush E.G., Malkov A.V., Kukharova T.V., Spivak A.O.* Operational control of underground water exploitation regimes, *Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019*, 2019, pp. 77-80.
16. *Pershin I.M., Pervukhin D.A., Iyushin Y.V., Afanaseva O.V.* Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 87, 032029, pp 1-7. doi: 10.1088/1755-1315/87/3/032029 (skop).
17. *Kukharova T.V., Pershin I.M., Malkov A.V.* The Study of Periodic Effects on Parameters of Hydrolithospheric Processes, *2019 International Science and Technology Conference "EastConf"*, 2019, pp. 7.
18. *Pershin I.M., Kuz'min N.N., Malkov A.V.* Formirovanie tselevykh funktsiy v zadachakh upravleniya gidrolitosfernymi protsessami [Formation of objective functions in hydrolithospheric process control problems], *5-ya Rossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: Sb. materialov konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v upravlenii» (ITU-2012)* [Proceedings of the 5th Russian Multiconference on Control Problems "Information Technologies in Control" (ITU-2012)], 2012, pp. 622-632.
19. *Drovosekova T.I., Pershin I.M.* Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of kavkazskiye mineralnye vody (caucasus mineral springs), *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016*, 2016, pp. 215-217.
20. *Asadulagi M.A.M., Pershin I.M., Tsapleva V.V.* Research on Hydrolithospheric processes using the results of groundwater inflow testing, *Water*, 2024, Vol. 16, No. 3, pp. 487.

Бондин Иван Андреевич – ООО "Холдинг Аква"; e-mail: bondin@sfedu.ru; г. Ессентуки, Россия; тел.: 89283385622; зам. директора Департамента недропользования; аспирант ЮФУ.

Bondin Ivan Andreevich – Subsoil Use Department of Holding Aqua LLC; e-mail: bondin@sfedu.ru; Essentuki, Russia; phone: +79283385622; deputy director; postgraduate student of SFU.