

DOI: [10.7242/1999-6691/2023.16.1.9](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2023.16.1.9)

УДК 532.5:556.18

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ВОДОЕМОВ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ВОДНЫХ МАСС В УСЛОВИЯХ АКТИВНОГО ТЕХНОГЕНЕЗА

Т.П. Любимова¹, А.П. Лепихин², Я.Н. Паршакова¹, А.В. Богомолов², Ю.С. Ляхин², А. Исахов³¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация*²*Горный институт УрО РАН, Пермь, Российская Федерация*³*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан*

Представлены результаты численного моделирования и натурного изучения устойчивости технического водоснабжения крупных промышленных предприятий. Водопотребление – один из важнейших показателей надежности их функционирования. Особенно остро проблема стоит перед предприятиями, расположенными в зонах активного техногенеза, где доминирующим фактором в формировании состояния водных объектов является участие не декларированных рассредоточенных, так называемых диффузных, источников загрязнения. Водные бассейны, создаваемые на неблагоприятной территории для целей технического водоснабжения, имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании. Так, зачастую их размер относительно невелик, и априори предполагается, что наполняющие водные массы однородны и по акватории, и по глубине. При этом для предотвращения возможного накопления в нижних (придонных) горизонтах отложений нежелательных примесей, как правило применяется промывка. Однако опыт эксплуатации предназначенных для промышленного использования водохранилищ в зоне разработки Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (Урал, Россия) показал, что в подобных водоемах, вследствие интенсивного диффузного загрязнения, имеет место значительная вертикальная неоднородность, принципиально изменяющая гидродинамику в них. На основе комплекса исследований, включающих натурные наблюдения и вычислительные эксперименты, показано, что ключевую роль в обеспечении устойчивости технического водоснабжения играет именно вертикальная неоднородность потребляемых водных масс.

Ключевые слова: водные объекты, моделирование качества воды, сезонная динамика, вертикальная стратификация водных масс

PECULIARITIES OF HYDRODYNAMICS OF WATER RESERVOIRS CHARACTERIZED BY THE VERTICAL DENSITY INHOMOGENEITY OF WATER MASSES UNDER ACTIVE TECHNOGENESIS CONDITIONS

T.P. Lyubimova¹, A.P. Lepikhin², Ya.N. Parshakova¹, A.V. Bogomolov², Yu.S. Lyakhin² and A. Isakhov³¹*Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation*²*Mining Institute UB RAS, Perm, Russian Federation*³*Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Republic of Kazakhstan*

The results of numerical modeling and field studies of the stability of technical water supply of large industrial enterprises are presented. Water consumption is one of the most important indicators of their operational reliability. This problem is especially acute for the enterprises located in zones of active technogenesis, where the dominant factor of pollution of water bodies is the presence of undeclared dispersed, so-called diffuse, sources of pollution. The reservoirs constructed in this territory to meet the purpose of technical water supply have a number of features that should be taken into account at the design stage. Typically, they are relatively small in size, and it is a priori assumed that the water masses produced in them are uniform in water area and depth. At the same time, in order to prevent possible accumulation of pollutants in the lower (near-bottom) horizons, they are generally flushed. However, the operating experience of such reservoirs in the development zone of the Verkhnekamskoe potash and magnesium salt deposit (VKMKMS) (Ural, Russia) showed that, due to intense diffuse pollution, significant vertical heterogeneity is formed in these reservoirs, which fundamentally changes their hydrodynamics. Based on a set of studies, including field observations and computational experiments, it is shown that the vertical heterogeneity of water masses plays a key role in ensuring the sustainability of technical water supply.

Key words: water bodies, water quality modeling, seasonal dynamics, vertical stratification of water masses

1. Введение

В силу широкого круга технологических, экономических, экологических факторов водоснабжение, как питьевое, так и техническое, зачастую осуществляется из поверхностных водных объектов. В качестве основных лимитирующих требований к источникам водоснабжения рассматриваются возможный и необходимый объемы забора воды, содержание в воде ингредиентов, удовлетворяющее санитарно-гигиеническим и технологическим требованиям [1]. При этом, как правило, априори предполагается, что качество воды в водоеме, по крайней мере по глубине, достаточно однородно. Однако проведенные в последние годы исследования показывают, что данное допущение выполняется далеко не всегда [2–11]. В достаточно крупных водных объектах, даже специально созданных для организации водоснабжения различных отраслей хозяйства (энергетики, судоходства, лесосплава, водоснабжения и сельского хозяйства), могут наблюдаться устойчивые вертикальные плотностные неоднородности (слоистость воды), которые различаются температурой, минерализацией и количеством содержащихся в них взвешенных веществ.

В свете обеспечения устойчивого водоснабжения наибольший интерес представляет неоднородность водных масс, обусловленная минерализацией, различием химического состава воды. Слоистость воды

по толще может иметь как совершенно разный генезис, так и характер проявления. В общем случае для формирования вертикальной стратификации в водном объекте необходимы:

- источник притока воды, характеризующейся значительно отличающейся плотностью от плотности окружающей жидкости;
- малые скорости течения, при которых не происходит интенсивного вертикального перемешивания и, соответственно, выравнивания плотности воды по глубине.

В связи с этим наиболее часто образование вертикальной неоднородности связано: со слиянием двух рек, характеризующихся разными свойствами водных масс, особенно, если реки объединяются в одно русло в подпоре от расположенной ниже плотины; с выходом в водный объект высокоминерализованных фильтрационных промышленных и бытовых разгрузок; с неоднородностью температуры в объеме воды. Гидродинамические эффекты от слияния двух рек часто оказывают определяющее влияние на устойчивость водопользования. Типичная для этой ситуации модель формирования вертикальной плотностной стратификации наблюдается в Камском водохранилище ниже впадения в него общего потока вод Чусовой и Сылвы [2–4]. Следует отметить еще одно важное обстоятельство: основной питьевой водозабор для города Перми — Чусовские очистные сооружения (ЧОС), также находится непосредственно в этой зоне. Таким образом, существенное различие жесткостей воды названных рек в зимний период стало причиной рассмотрения актуальной задачи — обеспечения устойчивого селективного отбора воды из Чусовой, характеризующейся меньшей, по сравнению с Сылвой, жесткостью. Решение проблемы имеет стратегическое значение не только с точки зрения промышленного потребления, но и для снабжения населения города Перми водой нормативного качества [3, 4].

Эта важная социальная задача включает два связанных между собой блока: гидрологический и гидродинамический.

В рамках гидрологического блока выполнен комплекс уникальных гидрологических и гидрохимических наблюдений с использованием современных средств измерений для оценки характера и масштабов стратификационных эффектов, сопровождающих слияние рек. В пределах гидродинамического блока построены модели интересующих процессов и проведены соответствующие вычислительные эксперименты по обработке оптимальных схем организации селективного отбора воды.

В целом гидрологический и гидродинамический аспекты решения данной проблемы рассматривались в [4]. На заключительной стадии — технической реализации проекта селективного отбора воды на ЧОС, требовались значения параметров донного барьера, который способен «отсекать» забор оголовками водозабора воды с повышенной жесткостью в условиях внутригодового регулирования работы Камской ГЭС. В ходе выполнения исследований выяснилось, что существенные внутрисуточные колебания уровня воды в водохранилище, как результат функционирования ГЭС, способны генерировать когерентные структуры, оказывающие значимое влияние на качество забираемой воды [12].

Наиболее распространенным механизмом формирования вертикальной плотностной неоднородности в водных объектах, расположенных в зонах активного техногенеза, являются разгрузки высокоминерализованных рассолов, связанные как с природными факторами, так и с процессами деятельности человека. При этом дополнительное, в ряде случаев определяющее влияние может оказывать вертикальная температурная неоднородность водных масс.

2. Материалы и методы

2.1. *Натурные измерения*

В качестве типичного примера, где устойчиво проявляется плотностная стратификация воды, рассматривается Верхне-Зырянское водохранилище, специально созданное для обеспечения технического водоснабжения калийных предприятий БКПРУ-2 и БКПРУ-4 (Березниковских калийных производственных рудоуправлений ПАО «Уралкалий»), расположенных в городе Березники (Рис. 1). Верхне-Зырянское водохранилище находится в долине реки Зырянка. Река Зырянка — левобережный приток реки Камы, впадает в 889 км от ее устья. Река Зырянка — результат слияния рек Извер и Легчим. Общая площадь ее водосбора равняется 365 км², длина 53.0 км (с рекой Извер), средний уклон водотока 2.2%. На площади водосбора насчитывается 116 водотоков, их общая протяженность 243.7 км, густота речной сети составляет 0.643. Река Зырянка относится к водным объектам с очень малой гидрологической изученностью, с практически полным отсутствием информации на гидрологических постах государственной сети наблюдений.

В среднем и нижнем течениях река перекрыта плотинами, в результате этого появились Верхне-Зырянское и Нижне-Зырянское (Сёминский пруд) водохранилища. На участке между ними отмечено 5 основных притоков, крупнейший из которых река Быгель. Створы плотин, образующих Верхне-Зырянское и Нижне-Зырянское водохранилища, расположены соответственно в 11.0 км и 1.0 км от устья реки Зырянки. Каскад созданных водоемов осуществляет сезонное регулирование стока и является единым водохозяйственным комплексом.

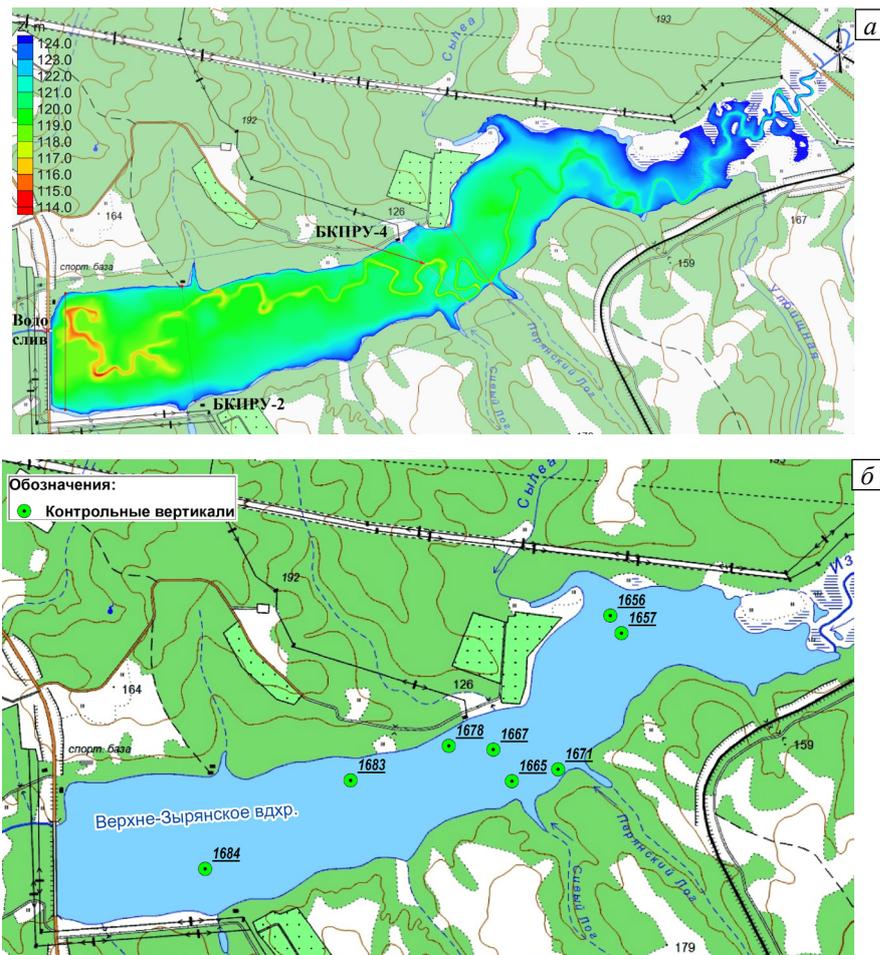


Рис. 1. Распределение глубин (а) по акватории Верхне-Зырянского водохранилища по данным батиметрической съемки, выполненной сотрудниками ГИ УрО РАН, и местоположение контрольных вертикалей на акватории (б)

Верхне-Зырянское водохранилище, построенное и введенное в постоянную эксплуатацию в 1969 году, расположено в 3.5 км юго-восточнее города Березники. Грунты на территории его водосбора преимущественно глинистые и тяжелосуглинистые. В понижениях формируются торфяные и торфяно-глеевые почвы. В геологическом строении ложа водохранилища принимают участие четвертичные и верхнепермские отложения.

Залесенность (естественное зарастание деревьями) территории водосбора Верхне-Зырянского водохранилища составляет около 90%. Растительность представлена главным образом среднетаежными лесами с преобладанием ели. Еловый лес может иметь примесь пихты, а местами перемежается осиновыми и березовыми лесами и сфагновыми болотами, на песках растут сосновые боры. На бедных почвах широколиственных древесных пород заметно меньше.

В состав гидротехнических сооружений вида водохранилищ, создаваемых для различных хозяйственных нужд, входят: чаша с плотиной (дамбой), система водосброса и система водоснабжения. Морфометрическая характеристика Верхне-Зырянского водохранилища приведена ниже в Балтийской системе высот (БС) [2]:

- отметка ФПУ (форсированный подпорный уровень или горизонт форсировки) 124.3 м;
- отметка НПУ (нормальный подпорный уровень) 124.0 м;
- отметка УМО (уровень мертвого объема или горизонт сработки водохранилища) 121.0 м;
- полный объем (объем, заключенный между дном чаши и зеркалом воды на отметке НПУ) 13.0 км³;
- полезный объем (разность объемов водохранилища при НПУ и УНС) 10.0 км³;
- площадь зеркала на отметке НПУ 4.2 км²;
- отметка уровня наибольшей сработки 123.0 м (согласно Правилам безопасной эксплуатации Верхне-Зырянского водохранилища);
- размеры водохранилища на отметке НПУ: длина 7.0 км, средняя ширина 0.6 км, средняя глубина 3.1 м.

Уровень воды в верхнем бьефе Верхне-Зырянского водохранилища стабилен и в среднем держится на отметке 123.4 м БС, что на 0.6 м ниже отметки НПУ и, соответственно, на 0.9 м ниже отметки ФПУ. Распределение глубин по акватории представлено на рисунке 1а. Максимальная глубина достигает 11.0 м. Наибольшие глубины отмечаются вдоль старого русла Зырянки.

При проектировании этого технического сооружения не была учтена возможность фильтрационных разгрузок в него, соответственно не предусмотрена организация его эффективной промывки при прохождении весеннего половодья. Кроме того, в связи с техническим переоснащением предприятий, переходом на новое оборудование значительно возросли требования к качеству забираемой воды. Предельно допустимое содержание (ПДК) хлоридов, рассматриваемых как основной лимитирующий ингредиент в воде, используемой для питьевых и культурно-бытовых целей, составляет 350 мг/л [14], для рыбохозяйственных водоемов — 300 мг/л [15], однако технологический регламент целого ряда промышленных предприятий Соликамско-Березниковского промышленного узла предписывает 100 мг/л. Комплекс гидрологических и гидрохимических наблюдений, выполненных в рамках исследования Верхне-Зырянского водохранилища, показал, что общая минерализация воды, включающая основные макрокомпоненты, в первую очередь хлориды, кальций, магний, калий, натрий, а соответственно, и удельная электропроводность воды существенно неоднородны по глубине потока (Рис. 2). При достаточной устойчивости фильтрационных процессов в условиях стабильности гидрологического режима водного объекта эти состояния устойчивы и не зависят от сезона года.

Как следует из рисунка 2, содержание макрокомпонентов в поверхностных горизонтах водохранилища практически на порядок меньше, чем в придонном слое. К тому же наблюдаются и значительные вертикальные градиенты температуры (Рис. 2, 3). Но так называемый «слой скачка» — горизонт, на котором происходит резкое изменение регистрируемой величины (температуры и электропроводности) находится на одной глубине. Эта особенность водных масс является дополнительным фактором, способствующим формированию устойчивой вертикальной стратификации.

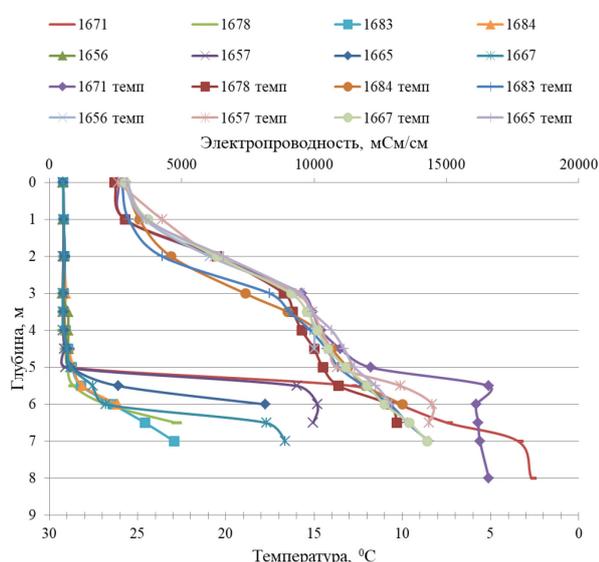


Рис. 2. Распределение по глубине измеренных значений удельной электропроводности и температуры воды на контрольных вертикалях

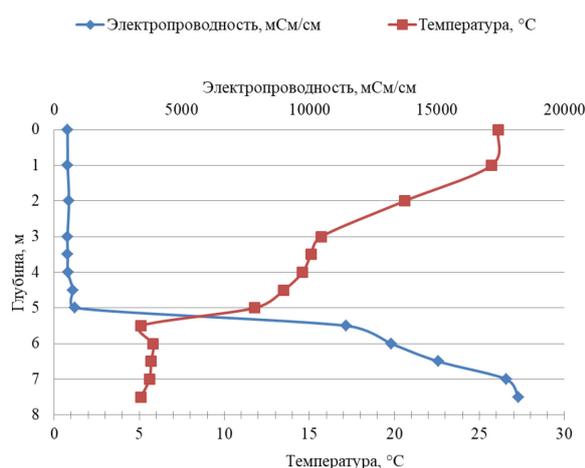


Рис. 3. Характерное распределение по глубине удельной электропроводности и температуры воды в летний период

Вычислительные эксперименты, выполненные на основе построенной гидродинамической модели в 3D постановке [10], показали, что границы раздела слоев водных масс устойчивы, они сохраняются при действующей конструкции водосбросного устройства даже при максимальных расходах воды в период весеннего половодья.

Так как промывка водохранилища технически не предусмотрена при проектировании, то для повышения устойчивости системы технического водоснабжения предприятий предлагается изменить положение водозаборных оголовков, а именно поднять их выше. Забор воды должен осуществляться из слоя, находящегося выше порога водослива. Этот слой воды, согласно как результатам вычислительных экспериментов, так и по данным натурных измерений, в течение года активно промывается, в нем не наблюдается устойчивого роста минерализации.

2.2. Математическая модель

Для анализа эффективности режимов промывания Верхне-Зырянского водохранилища проведена серия вычислительных экспериментов на основе сопряжения гидродинамических моделей в 2D и 3D постановках. Гибридная схема расчетов уже неоднократно успешно применялась при решении конкретных водохозяйственных задач [3, 6–8]. При этом, в отличие от задачи, рассмотренной в [10], в данном

исследовании учитывалась неравномерность распределения по глубине не только минерализации, но и температуры воды, что для летнего периода имеет очень важное значение.

Гидродинамическая модель в 2D постановке строилась в специализированном программном продукте SMS v.11.1 американской компании AQUAVEO LLC [16], а трехмерное численное моделирование проводилось в пакете ANSYS Fluent (ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA), основанном на методе конечных объемов. Неравномерная сетка получалась по технологии пакета ANSYS Fluent.

Для оценки влияния расхода воды, пропускаемой через плотину, на положение слоя скачка минерализации по глубине $0 \leq z \leq H$ проводилось 3D численное моделирование. Решалась задача для реальной геометрии исследуемого объекта (Рис. 4) Расчетная область по акватории разбивалась на четырехугольные ячейки с линейным размером 20 м, по глубине сетка имела 80 узлов и сгущалась в направлении дна водохранилища; максимальный вертикальный размер ячейки составлял 0.3 м, минимальный 0.02 м. Общее число узлов расчетной сетки равнялось 670000.

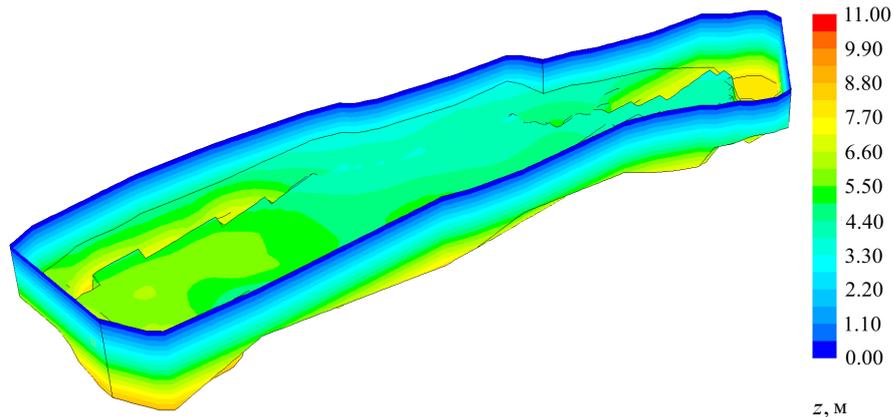


Рис. 4. Расчетная сетка при 3D моделировании участка Верхне-Зырянского водохранилища длиной 3.1 км; максимальная глубина составляет 11 м; для визуализации вертикальный масштаб увеличен в 20 раз

В начальный момент времени распределение концентрации по глубине считалось неравномерным:

$$C(z) = \begin{cases} 0.3 \text{ г/л}, & z > 4, \\ 3.0 \text{ г/л}, & z \leq 4. \end{cases} \quad (1)$$

Температура полагалась постоянной и равной значению на дне чаши $T = 7^\circ\text{C}$.

Из выпускного устройства плотины при поднятии затворов водосбросов, нижняя часть которых расположена на глубине 4 м от свободной поверхности водохранилища, с постоянной скоростью v вытекала вода. На входе в расчетную область задавался постоянный поток со скоростью U .

Для вычислений применялся метод конечных объемов. Расчеты проводились в рамках нестационарной неизотермической задачи до получения стационарного решения с относительной точностью 3.5×10^{-4} . Турбулентные пульсации описывались с помощью $(k-\varepsilon)$ -модели как наименее ресурсо- и времязатратной. Параметризация плотности воды в зависимости от минерализации и температуры производилась на основе уравнения состояния в виде степенной функции:

$$\rho = \rho_0 + A_c c + B_c c^{1.5} + D_c c^2,$$

где

$$\rho_0 = 999.843 + 0.067939 T - 0.009095 T^2 + 0.000169 T^3,$$

$$A_c = 0.824 - 0.004090 T + 0.000076 T^2,$$

$$B_c = -0.005726 + 0.000102 T, \quad C_c = 0.000483.$$

Перепад плотности по глубине достигал 10%.

Уравнения баланса массы и импульса имели вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \right] + \rho g_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) содержат следующие обозначения: ρ — плотность жидкости; v_i — компоненты скорости в декартовых координатах ($i = x, y, z$), при этом z — вертикальная координата, x и y — горизонтальные координаты, основной поток направлен вдоль x -координаты; μ — кинематическая вязкость жидкости; δ_{ij} — символ Кронекера. Турбулентная вязкость μ_t является функцией турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε : $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, где C_μ — константа.

Уравнения для нахождения турбулентной энергии и скорости ее диссипации записывались в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) имеют место следующие обозначения: $G_k = \mu_t S^2$ — генерация турбулентной кинетической энергии за счет среднего градиента скорости; $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ — норма тензора средней скорости деформации потока, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)$; Pr_t — турбулентное число Прандтля; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ — константы.

В уравнение для турбулентной кинетической энергии входит член $G_b = -\frac{g_j (\mu_t / \rho)}{Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_j}$, описывающий

генерацию турбулентной энергии за счет сил плавучести в поле силы тяжести. Поскольку вектор ускорения свободного падения \mathbf{g} направлен вертикально вниз, в случае устойчивой плотностной стратификации ($\partial \rho / \partial x_3 < 0$) вышеуказанный член является отрицательным, что означает уменьшение турбулентной кинетической энергии при действии сил плавучести.

Применимость ($k - \varepsilon$)-модели турбулентности была проверена тестовыми расчетами с использованием модели более высокого порядка — модели Рейнольдса, в которой решаются семь дополнительных уравнений для напряжений Рейнольдса. Обнаружено, что для различных сеток отличие в полученных данных для интегральных значений компонент скорости в различных сечениях составляет менее 5%.

Уравнение переноса примеси записывалось в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} c) = -\nabla \cdot \mathbf{J}. \quad (6)$$

В уравнении (6) содержатся следующие обозначения: ∇ — оператор набла; \mathbf{J} — вектор диффузионного потока примеси, определяемый выражением

$$\mathbf{J} = -\rho (D_m + D_t) \nabla c. \quad (7)$$

Здесь: D_m — коэффициент молекулярной диффузии; D_t — эффективный коэффициент турбулентной диффузии, связанный с турбулентной вязкостью μ_t соотношением $D_t = (\mu_t / \rho) / Sc_t$, где Sc_t — турбулентное число Шмита.

Турбулентный перенос тепла представлялся с использованием модели Рейнольдса аналогично турбулентному переносу импульса. Уравнение для энергии имело следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i \rho C_p T] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\kappa_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right), \quad (8)$$

где C_p — удельная теплоемкость, κ_{eff} — эффективная теплопроводность, $(\tau_{ij})_{eff}$ — девиатор тензора напряжений

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}, \quad (9)$$

при этом $\mu_{eff} = \kappa_{eff} Pr / C_p$ — эффективная вязкость, определяемая через эффективную теплопроводность: $\kappa_{eff} = \kappa + C_p \mu_t / Pr_t$, где κ — коэффициент теплопроводности.

Граничные условия, при которых решалась задача (1)–(9), приведены ниже для разных границ системы: – на дне и берегах чаши, то есть на жестких границах, предполагалось выполнение условий прилипания и нулевого потока массы

$$v_x = v_y = v_z = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0, \quad T = T_0; \quad (10)$$

– на входе в расчетную область задавалась скорость основного потока (вектор скорости потока окружающей среды перпендикулярен входной границе $\mathbf{U} = \{U, 0, 0\}$); концентрация устанавливалась равной фоновой концентрации загрязняющего вещества в воде:

$$v_x = U, \quad v_y = 0, \quad v_z = 0, \quad c = c_0, \quad T = T_0 + z(T_a - T_0)/H; \quad (11)$$

– верхняя граница области, соответствующая свободной поверхности жидкости, полагалась недеформируемой; на ней считались отсутствующими нормальная компонента скорости жидкости, касательные напряжения и поток примеси

$$(\mathbf{v}\mathbf{n}) = 0, \quad \frac{\partial v_x}{\partial x_z} + \frac{\partial v_z}{\partial x_x} = 0, \quad \frac{\partial v_y}{\partial x_z} + \frac{\partial v_z}{\partial x_y} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0, \quad \kappa \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_e), \quad (12)$$

где h — коэффициент теплообмена, T_e — температура воздуха;

– на поверхности воды задавался линейный закон теплоотдачи, учитывающий нагрев поверхности от окружающего воздуха; коэффициент теплообмена выбирался на основании данных полевых измерений и составлял $100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$;

– на выходе из расчетной области требовалось выполнение условия баланса массы

$$\oint_{S_{in}} \rho v_m dS - \oint_{S_{out}} \rho v_{out} dS = 0. \quad (13)$$

Используемые при решении задачи (1)–(9) эмпирические константы и их значения брались из работы [9]: $Pr_t = 0.85$, $Sc_t = 0.7$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$. Кинематическая вязкость принималась равной $\mu = 9.34 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент молекулярной диффузии составлял $D = 1.0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Для коэффициента шероховатости дна реки взято значение 0.035, которое соответствует однородной поверхности песчаных зерен и их диаметру 0.001 м. При получении дискретных аналогов разрешающих уравнений применялись конечные объемы с «привязкой» переменных к центрам граней. При выполнении пространственной дискретизации уравнений схема имела второй порядок точности. Временная эволюция моделировалась на основе явной схемы второго порядка аппроксимации. Трехмерное численное моделирование осуществлялось в программном пакете ANSYS Fluent на вычислительном кластере URAN Института математики и механики им. Н.Н. Красовского (Екатеринбург, Россия).

3. Результаты

Результаты численных экспериментов наглядно показывают наличие скачка минерализации водных масс на водозаборе БКПРУ-4 (см. Рис. 1), несмотря на пропуск низкоминерализованной воды. При сливе воды происходит определенная промывка водохранилища, однако наблюдается не полное вымывание соли, а лишь ниже располагается слой плотностного скачка.

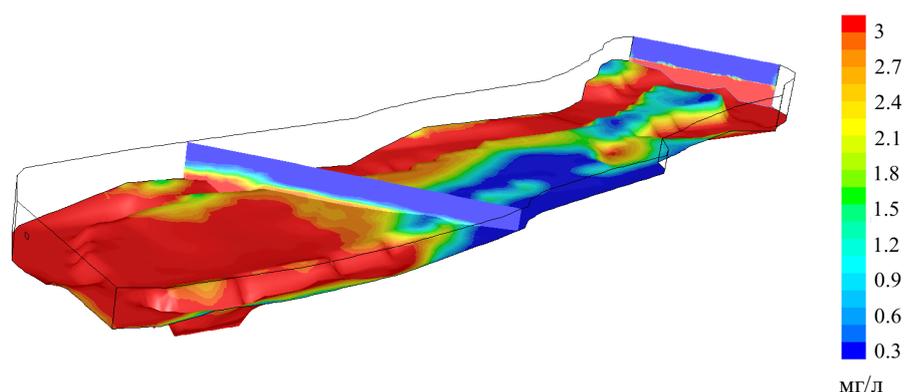


Рис. 5. Распределения минерализации на дне и в вертикальных сечениях близы водозабора БКПРУ-4 при расходе воды на водопропускных устройствах $2,04 \text{ м}^3/\text{с}$; для визуализации вертикальный масштаб увеличен в 20 раз

Далее приведены результаты вычислений для характерного летнего расхода воды. На рисунке 5 показано поле минерализации воды на расчетном участке Верхне-Зырянского водохранилища. Видно, что промывка данного водного объекта при существующем местоположении водопропускных отверстий не возможна. При их проектной заглубленности свежая, весенняя (неминерализованная) вода «скользит» по границе раздела слоев и практически не замещает более минерализованную воду из придонных горизонтов.

Слой скачка минерализации по глубине для двух вертикалей, соответствующих вертикалям натуральных измерений 1683 и 1684 (см. Рис. 1б), показан на рисунке 6а. Расположение слоя скачка совпадает качественно с данными рисунка 2. Распределение температуры по глубине также имеет нелинейный характер (см. Рис. 6б).

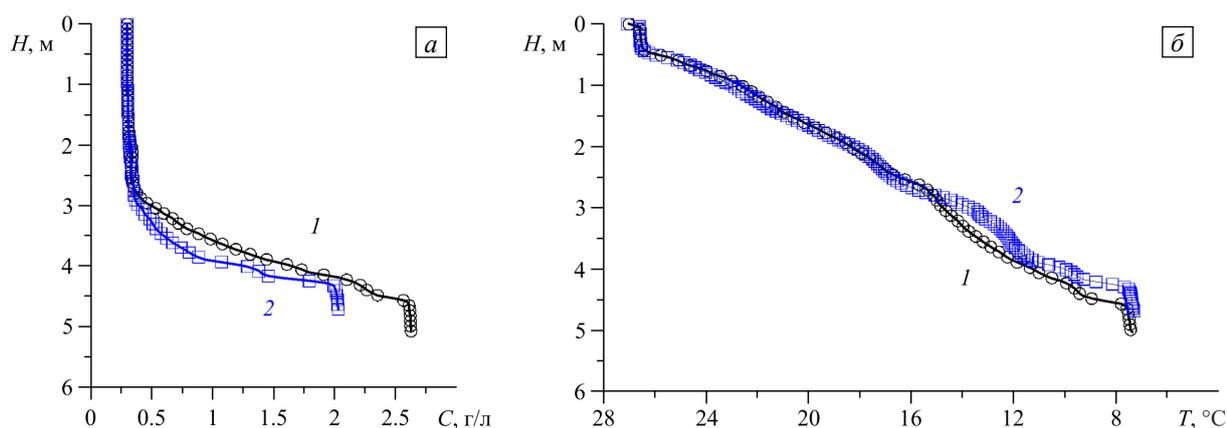


Рис. 6. Изменение минерализации (а) и температуры (б) близы водозабора БКПРУ-4 на различных контрольных вертикалях (см. Рис. 1б): на 1683 (1); на 1684 (2)

Полученные результаты свидетельствуют о невозможности эффективной промывки водоема при эксплуатируемой конструкции водосливного устройства. Распределение минерализации станет существенно другим, если водопропускное отверстие расположить на 2 м ниже действующей конфигурации. При таком, более глубинном, размещении водослива зоны повышенной минерализации будут образовываться только в отдельных локальных понижениях рельефа дна и не скажутся на качестве забираемой воды. Наблюдаемая в летний период года значительная вертикальная неоднородность водных масс по температуре усиливает плотностное расслоение и еще более снижает продуктивность промывки за счет слива. В связи с этим для обеспечения устойчивой работы существующего водозабора изменить конструкцию водосливного устройства на сегодняшний день не представляется возможным, по авторским результатам исследований принято решение повысить местоположение водозаборного оголовка на БКПРУ-4 (см. Рис. 1а).

4. Заключение

Водные объекты, находящиеся в зонах активного техногенеза, могут характеризоваться значительным диффузным загрязнением, формируемым за счет фильтрационных разгрузок в подземных водах придонной области. Выполненный комплекс как натуральных исследований, так и вычислительных экспериментов показал, что в этих условиях при низких скоростях течений образуется устойчивая вертикальная плотностная стратификация, оказывающая заметное влияние на качество забираемой для хозяйственных

нужд воды. Так, в Верхне-Зырянском водохранилище, в его нижнем придонном слое, создается обширная область повышенной минерализации воды. В условиях постоянной плотностной стратификации для увеличения устойчивости функционирования системы водоснабжения из данного и подобных ему объектов необходим переход на селективные технологии забора воды.

Существующая конструкция плотины не позволяет производить эффективную промывку водохранилища, таким образом отсутствует возможность вытеснения высокоминерализованных вод, сконцентрированных в придонных слоях. Поэтому для обеспечения устойчивого водоснабжения промышленных предприятий, пользующихся водами Верхне-Зырянского водохранилища, предложено выполнить реконструкцию расположения оголовков водозабора путем поднятия их отметки выше границы расслоения водных масс.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-41-590013 и № 20-45-596028) и Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/828.

Литература

1. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.
2. Лепихин А.П., Немковский Б.Б., Онянов В.А., Капитанова Е.Н. Селективный отбор воды // ВСТ. 1988. № 3. С. 27-28.
3. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Konovalov V., Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // J. Hydrol. 2014. Vol. 508. P. 328-342. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.041>
4. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Возняк А.А., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С. Особенности регулирования качества воды при ее селективном заборе из водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 3. С. 56-68.
5. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н. Численное моделирование отведения высокоминерализованных сточных вод в водные объекты с целью усовершенствования конструкций выпускных устройств // Вычисл. мех. сплош. сред. 2019. Т. 12, № 4. С. 427-434. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.4.36>
6. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Lyakhin Yu., Tiunov A. Application of hydrodynamic modeling in 2D and 3D approaches for the improvement of the recycled water supply systems of large energy complexes based on reservoirs-coolers // Int. J. Heat Mass Tran. 2019. Vol. 140. P. 897-908. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.105>
7. Лепихин А.П., Веницианов Е.В., Любимова Т.П., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Влияние вертикальной неоднородности водных масс на устойчивость промышленного водоснабжения в зонах высокой техногенной нагрузки // Труды КарНЦ РАН. 2021. № 4. С. 53-63. <https://doi.org/10.17076/lim1419>
8. Лепихин А.П., Возняк А.А., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Исследование особенностей формирования и масштабов диффузного загрязнения, сформированного крупными промышленными комплексами, на примере Соликамско-Березниковского промузла // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 560-566. <https://doi.org/10.31857/S0321059620050120>
9. Богомолов А.В., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Гребенева М.Г. Особенности колебаний вертикальных структур полей минерализации в камском водохранилище в период летней межени в районе в Березники // Горное эхо. 2021. № 4 (85). С. 3-11. <https://doi.org/10.7242/echo.2021.4.1>
10. Lyubimova T., Parshakova Ya., Lepikhin A., Bogomolov A., Lyakhin Y., Tiunov A. Peculiarities of hydrodynamics of small surface water bodies in zones of active technogenesis (on the example of the Verkhne-Zyryansk reservoir, Russia) // Water. 2021. Vol. 13. 1638. <https://doi.org/10.3390/w13121638>
11. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С. Влияние на качество отбираемой воды нестационарности скоростного режима водного объекта при наличии в нем плотностной стратификации // Вычисл. мех. сплош. сред. 2022. Т. 15, № 2. С. 133-144. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.2.10>
12. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Ya.N., Bogomolov A.V. Coherent structures at the interface between water masses of confluent rivers // Water. 2022. Vol. 14. 1308. <https://doi.org/10.3390/w14081308>
13. Лепихин А.П., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С. К особенностям формирования качества воды р. Камы (Камского водохранилища) в зимний период в районе г. Березники // Горное эхо. 2022. № 1 (86). С. 13-25.
14. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.
15. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».
16. Donnell B.P., Letter J.V., Dr. McAnally W.H., Thomas W.A. Users Guide for RMA2 Version 4.5. 2011. 298 p. <http://smsdocs.aquaveo.com>

References

1. SP 31.13330.2012. Water supply. Pipelines and portable water treatment plants.
2. Lepikhin A.P., Nemkovskiy B.B., Onyanov V.A., Kapitanova E.N. Selektivnyy otbor vody [Selective water selection]. *VST – Water Supply and Sanitary Technique*, 1988, no. 3, pp. 27-28.
3. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Konovalov V., Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers. *J. Hydrol.*, 2014, vol. 508, pp. 328-342. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.041>

4. Lepikhin A.P., Lyubimova T.P., Voznyak A.A., Parshakova Y.N., Bogomolov A.V., Lyakhin Y.S. Specific features of water quality regulation in process of its selective abstraction from reservoirs. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye – Water industry of Russia: problems, technologies, management*, 2017, no. 3, pp. 56-68.
5. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Ya.N. Numerical modeling of wastewater discharge into water bodies for the improvement of discharge devices. *J. Appl. Mech. Tech. Phy.*, 2020, vol. 61, pp. 1250-1256. <https://doi.org/10.1134/S002189442007007X>
6. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Lyakhin Yu., Tiunov A. Application of hydrodynamic modeling in 2D and 3D approaches for the improvement of the recycled water supply systems of large energy complexes based on reservoirs-coolers. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2019, vol. 140, pp. 897-908. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.105>
7. Lepikhin A.P., Venitsianov E.V., Lyubimova T.P., Tiunov A.A., Parshakova Ya.N., Lyakhin Yu.S., Bogomolov A.V. Effects of the vertical heterogeneity of water masses on the stability of industrial water supply in industry-intensive areas. *Trudy KarNTs RAN – Transactions of KarRC RAS*, 2021, no. 4, pp. 53-63. <https://doi.org/10.17076/lim1419>
8. Lepikhin A.P., Voznyak A.A., Lyubimova T.P., Parshakova Ya.N., Lyakhin Yu.S., Bogomolov A.V. Studying the formation features and the extent of diffuse pollution formed by large industrial complexes: Case study of the Solikamsk–Berezniki industrial hub. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, pp. 744-750. <https://doi.org/10.1134/S0097807820050127>
9. Bogomolov A.V., Lepikhin A.P., Lyakhin Yu.S., Grebeneva M.G. Osobennosti kolebaniy vertikal'nykh struktur poley mineralizatsii v kamskom vodokhranilishche v period letney mezheni v rayone v Berezniki [Features of the change in the vertical structures of mineralization fields in the Kama reservoir during the summer low water period in the Berezniki region]. *Gornoye ekho – Mountain echo*, 2021, no. 4 (85), pp. 3-11. <https://doi.org/10.7242/echo.2021.4.1>
10. Lyubimova T., Parshakova Y., Lepikhin A., Bogomolov A., Lyakhin Y., Tiunov A. Peculiarities of hydrodynamics of small surface water bodies in zones of active technogenesis (on the example of the Verkhne-Zyryansk reservoir, Russia). *Water*, 2021, vol. 13, 1638. <https://doi.org/10.3390/w13121638>
11. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Ya.N., Bogomolov A.V., Lyakhin Yu.S. Influence of non-stationary river discharge on the quality of water withdrawal in the presence of density stratification. *Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational continuum mechanics*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 133-144. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.2.10>
12. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Y.N., Bogomolov A.V. Coherent structures at the interface between water masses of confluent rivers. *Water*, 2022, vol. 14, 1308. <https://doi.org/10.3390/w14081308>
13. Lepikhin A.P., Bogomolov A.V., Lyakhin Yu.S. K osobennosti formirovaniya kachestva vody r. Kamy (Kamskogo vodokhranilishcha) v zimniy period v rayone g. Berezniki [To the features of the formation of water quality of the river. Kamy (Kama reservoir) in winter near the town of Berezniki]. *Gornoye ekho – Mountain echo*, 2022, no. 1 (86), pp. 13-25.
14. SanPiN 2.1.3684-21. Sanitary and epidemiological requirements for water consumption and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, production operation, coverage of premises, coverage and sanitary and hygienic conditions of anti-epidemic (preventive) measures.
15. Order of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation of December 13, 2016 No. 552 "General standards for the quality of water objects of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful effects in the waters of objects of aquatic fishery significance".
16. Donnell B.P., Letter J.V., Dr. McAnally W.H., Thomas W.A. *Users Guide for RMA2 Version 4.5*. 2011. 298 p. <http://smsdocs.aquaveo.com>

Поступила в редакцию 07.12.2022; после доработки 09.12.2022; принята к опубликованию 12.12.2022

Сведения об авторах

Любимова Татьяна Петровна, дфмн, проф., зав. лаб., Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; e-mail: lyubimovat@mail.ru

Лепихин Анатолий Павлович, дгн, проф., зав. лаб., Горный институт УрО РАН (ГИ УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 78а; e-mail: lepihin49@mail.ru

Паршакова Янина Николаевна, кфмн, снс, ИМСС УрО РАН; e-mail: parshakova@icmm.ru

Богомолов Андрей Владимирович, ктн, нс, ГИ УрО РАН; e-mail: whitewing85@mail.ru

Ляхин Юрий Сергеевич, ктн, нс, ГИ УрО РАН; e-mail: ljahin85@mail.ru

Исахов Алибек, доктор философии, проф., Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Республика Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, д. 71; e-mail: alibek.issakhov@kaznu.edu.kz