

УДК 519.711.3, 556.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.35.4.001](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.35.4.001)

Анализ методов моделирования гидрогеологических систем

И.В. Калиберда

*Северо-Кавказский федеральный университет,
Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ в г. Пятигорск,
Российская Федерация*

Резюме: Эксплуатация месторождений минеральных вод требует их рационального использования. Чтобы избежать ухудшения качества воды и нарушения гидродинамических процессов месторождений, необходима единая система мониторинга и управления процессом добычи природных ресурсов. В связи с этим ставится задача разработки системы автоматизированного управления, способной анализировать происходящие изменения и вносить корректировки в параметры добычи. Однако современные методы моделирования гидрогеологических объектов имеют ряд недостатков и требуют серьезного анализа для получения достоверных результатов моделирования. В ходе исследования были рассмотрены методы моделирования гидрогеологических систем, реализованные на месторождениях Кавминвод (КМВ). Основное направление развития получили методы, использующие фильтрационное моделирование. Рассмотрены такие уравнения, описывающие процессы геофильтрации, как двумерные и трехмерные. Описаны особенности применения трех моделей с учетом строения и расположения водоносных горизонтов и грунтовых вод. Произведен учет изменения вертикального скоростного компонента потока между водоносными горизонтами и горизонтом грунтовых вод. Представлены значения погрешностей моделирования по каждому методу. Результаты исследования представляют конструктивные и физические параметры рассмотренных моделей, реализованных на гидрогеологических объектах региона КМВ. Модели имеют допустимую погрешность, определенную на основе сравнения значений модельного эксперимента с полученными на реальных объектах данными, в связи с чем сделан вывод о их эффективности в решении данного класса задач. Для повышения достоверности результатов необходим учет количества пластов, их состава, структуры, целостности, и, кроме того, включение параметров, учитывающих их взаимное влияние.

Ключевые слова: методы моделирования, гидрогеологическая система, процессы геофильтрации, трехмерное моделирование, анализ систем.

Для цитирования: Калиберда И.В. Анализ методов моделирования гидрогеологических систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1034> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.001

Analysis of methods for modeling hydrogeological systems

I.V. Kaliberda

*North Caucasus Federal University,
Institute of Service, Tourism and Design (branch) of NCFU in Pyatigorsk,
Russian Federation*

Abstract: The exploitation of mineral deposits requires their rational use. In order to avoid deterioration of water quality and disruption of hydrodynamic processes of deposits, a unified system of natural resources extraction process monitoring and management is necessary. In this regard, the goal is to develop an automated control system that can analyze the changes taking place and make adjustments to the production parameters. However, modern methods of modeling hydrogeological objects have a number of disadvantages and require serious analysis to collect reliable modeling results. In the study,

the methods of modeling hydrogeological systems implemented at the Kavminvod deposits were evaluated. The main direction of development was obtained by methods using filtration modeling. Such equations describing the processes of geofiltration as two-dimensional and three-dimensional are considered. The results of the study represent the design and physical parameters of the reviewed models implemented on hydrogeological objects of the CMS region. The models have an acceptable error determined by comparing the values of the model experiment with the data derived from real objects; therefore, it is concluded that they are effective in solving this class of problems. To increase the reliability of the results, it is necessary to take into account the number of layers, their composition, structure and integrity and, additionally to include parameters that does not ignore their mutual influence.

Keywords: modeling methods, hydrogeological system, geofiltration processes, three-dimensional modeling, system analysis.

For citation: Kaliberda I.V. Analysis of methods for modeling hydrogeological systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1034> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.001 (In Russ).

Введение (Introduction)

На современном этапе в практике эксплуатации месторождений минеральных вод стоит острая задача их рационального использования. Создание единой системы мониторинга и управления процессом добычи природных ресурсов позволило бы избежать ряда проблем, связанных с ухудшением качества воды и нарушением гидродинамических процессов месторождений, ведущих к разрушению водоносных пластов.

Основная проблема состоит в том, что полученная добывающими предприятиями оперативная информация об изменении гидродинамических параметров пласта обрабатывается бессистемно и не оперативно. В связи с чем предлагается использовать измеренные значения в качестве данных систем контроля состояния месторождений и эффективного управления процессом добычи. Для реализации данного решения необходима разработка системы автоматизированного управления, способной анализировать происходящие изменения и вносить корректировки в параметры добычи. Преимущества использования данной системы очевидны, применение ее для региона позволит:

- сохранить качество минеральной воды;
- минимизировать вред месторождению, причиняемый во время откачки воды;
- определить параметры, обеспечивающие максимально возможный объем добычи минеральной воды без нанесения вреда месторождению;
- обеспечить стабильность добычи на перспективу.

Однако современные методы моделирования гидрогеологических объектов имеют ряд так называемых «допустимых упрощений» модели, которые для описания сложного строения объекта не обладают достаточной точностью представления гидродинамических процессов. Как следствие, существующие методы не дают возможности получить достоверные результаты моделирования.

Материалы и методы (Materials and Methods)

Существуют методы моделирования гидрогеологических систем, реализованные на месторождениях Кавминвод (КМВ). При проведении гидрогеологических исследований были использованы статические и фильтрационные модели. Выбор модели обусловлен поставленной задачей [1]. Особенностью фильтрационных моделей является наиболее точное описание геологического строения месторождения. При

составлении модели данного типа, помимо процессов перетекания учитывается такой набор внешних факторов на реальный объект, как количество выпадающих осадков, различная глубина залегания пород и другие, что способствует значительному увеличению времени вычислительного процесса [2] и, как следствие, требует больших вычислительных мощностей. Статический тип моделей требует минимального объема данных, ограничиваясь реакцией объекта на входное воздействие и, как следствие, относительно небольших программных ресурсов. Как показывает опыт, целесообразно использовать комбинацию представленных методов в зависимости от поставленной задачи по разработке модели [3], учитывающих:

- для построения системы управления сложного гидрогеологического объекта – влияние максимального количества факторов;
- для определения влияния конкретного фактора на реакцию объекта без значительной потери точности моделирования – только основные факторы.

В настоящее время, с учетом развития компьютерных технологий и возросших требований к результатам научных исследований, свое распространение получило фильтрационное моделирование. Однако существующие проблемы практического внедрения данного метода, такие как, например, невозможность сравнения методов при определении наиболее эффективных границ их применения, ставит фильтрационное моделирование в начальную стадию исследований.

При описании характера протекания гидродинамических процессов на добывающих скважинах основное направление развития получили методы моделирования месторождений с использованием уравнений геофильтрации [4]. Уравнение массопереноса в исследовании, было решено не учитывать в виду отсутствия необходимости рассматривать перенос вещества и незначительного изменения минерализации воды [5]. Достоверность результатов применения геофильтрационной модели подробно описана в [4].

Реализация геофильтрационной модели происходит посредством описания уравнения в частных производных. Описываются граничные условия. Исходными данными являются геометрические и физические параметры водоносных горизонтов, характеристики их взаимного влияния и т. д. Получение данных происходит в ходе натурных измерений. Основная сложность при создании модели заключается в обеспечении точности соответствия результатов моделирования оригиналу. В связи с этим, для проверки необходимо применять методику верификации. [6].

Суть методики верификации состоит в сравнении параметров реакции реального объекта и параметров реакции модели. Если показатель погрешности больше 20 %, то необходима корректировка параметров, позволяющая повысить сходимость данных до необходимого значения.

Процесс геофильтрации в плоском пространстве описывается двумерным уравнением:

$$\mu^* \cdot \frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(km_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(km_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + b_k \cdot (H_k - H) + b_n \cdot (H_n - H), \quad (1)$$

где:

H – уровень статического напора воды в водоносном пласте, м;

H_k – уровень напора воды в верхнем пласте, м;

H_n – уровень напора воды в нижнем пласте, м;

μ^* – упругость пласта, ($\mu^* = m \cdot \eta^*$, где m – толщина пласта, м; η^* – параметр

упругости пласта, 1/м) [7], доли ед.;

b_k – коэффициент перетекания с верхнего пласта на моделируемый, сут⁻¹;

b_n – коэффициент перетекания с нижнего пласта на моделируемый, сут⁻¹;
 km_x – коэффициент фильтрации водоупора над моделируемым пластом, м/с;
 km_y – коэффициенты фильтрации водоупора под моделируемым пластом, м/с.

При построении математической модели может применяться двухмерность потока, когда колебания уровня напора грунтовых вод происходят в границах пласта и вертикальная скоростная составляющая потока не значительна. Исходя из этих условий гидрогеологом общества «Нарзан» Дубогреем В.Ф. было составлено двумерное уравнение геофильтрации Кисловодского месторождения [4]. Изображение среза месторождения проиллюстрировано на Рисунке, где: (1) – пласт с валунно-галечниковыми отложениями; (2) – пласт с песчаником красновато-бурым кварцевым; (3) – пласт, состоящий из песчаника разноокрашенного, глинистого, слюдистого.

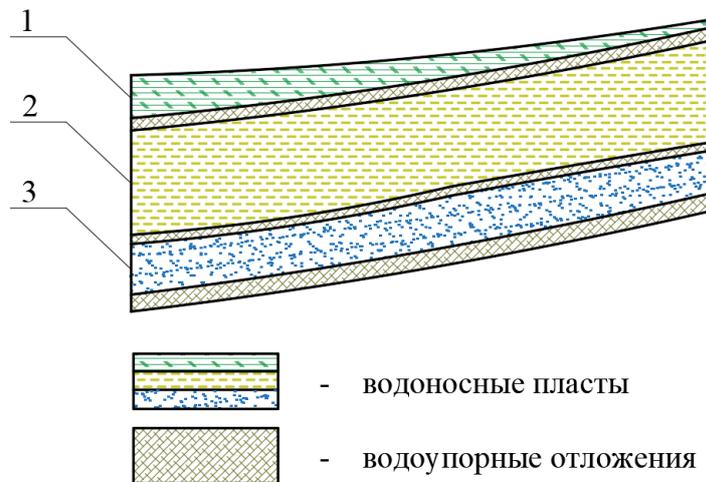


Рисунок – Фрагмент разреза Кисловодского месторождения
 Figure – Fragment of the section of the Kislovodsk field

Дубогреем В.Ф. была предложена плоскопространственная геофильтрационная модель из трех слоев. Первый слой представляет собой пласт, в которых происходит движение грунтовых вод, второй и третий представляют собой пласты водоносных горизонтов. Водоносные пласты разделены по плоскости водоупорными отложениями. Через водоупоры наблюдается переток вод. В результате система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \mu_1 \cdot \frac{\partial H_1}{\partial \tau} = km_{1,x} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} + km_{1,y} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} + b_{1,2} \cdot (H_2 - H_1) + W_a; \\ \mu_2 \cdot \frac{\partial H_2}{\partial \tau} = km_{2,x} \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} + km_{2,y} \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} + b_{2,3} \cdot (H_3 - H_2) + b_{1,2} \cdot (H_1 - H_2); \\ \mu_3 \cdot \frac{\partial H_3}{\partial \tau} = km_{3,x} \frac{\partial^2 H_3}{\partial x^2} + km_{3,y} \frac{\partial^2 H_3}{\partial x^2} + b_{2,3} \cdot (H_2 - H_3); \end{cases} \quad (2)$$

где:

km – водопроводимость горизонта, м²/сут;
 W_a – величина оттока из горизонта, м²/сут.

Начальные условия модели месторождения обусловлены тем, что нижняя граница водонепроницаема, а верхняя представляет собой грунтовые воды. Граничные условия описываются следующим образом:

$$t = 0, Q = 0, H = H_{cm}, \quad (3)$$

где Q – количество добытой минеральной воды за сутки, м/сут.

В результате экспериментов была доказана высокая точность моделирования. Способ математического описания гидрогеологического объекта, разработанный Дубогреем В.Ф., имеет погрешность 10-20 % [4].

Когда между водоносным горизонтом и грунтовыми водами имеют место существенные изменения скоростного компонента потока по вертикали, представление модели требует описания с помощью трехмерного пространства [8]. За основу математической модели взято дифференциальное уравнение [3], которое имеет следующий вид:

$$\eta^* \cdot \frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где:

- η^* – параметр упругоёмкости пласта, 1/м;
- k_x – фильтрация по x , м/сут;
- k_y – фильтрация по y , м/сут;
- k_z – фильтрация по z , м/сут;
- H – давление воды в пласте, м.

Трёхмерная математическая модель была применена исследователем Атрощенко И.О. для Кисловодского месторождения [9], в которой описывался один водоносный пласт. Из данного пласта добывается минеральная вода. В результате описания уравнение может быть представлено как:

$$\left\{ \frac{\partial S}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta^*} \cdot \left(k_x \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) - F \frac{\partial S}{\partial \tau} - S(\tau) \cdot \delta(x, y, z), \right. \quad (5)$$

где:

- S – изменение давления воды, м;
- $S(\tau)$ – величина водозабора;
- k_x, k_y, k_z – фильтрация по координатам x, y, z соответственно, м/сут.;
- F – скорость потока ($F = F_0 - a \sin(S)$ [5]), м/сут.;

С учетом отсутствия изменений на краю модели, граничные условия описываются следующим образом:

$$\begin{aligned} S(x, y, z, 0) &= 0; \\ \frac{\partial S(x_1, y, z, \tau)}{\partial x} &= 0, \quad \frac{\partial S(x_4, y, z, \tau)}{\partial x} = 0; \\ S(x, y_1, z, 0) &= 0, \quad \frac{\partial S(x, y_4, z, \tau)}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial S(x, y, z_1, \tau)}{\partial z} &= 0; \quad \frac{\partial S(x, y, z_4, \tau)}{\partial z} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где 1, 4 – порядковые номера пластов в срезе.

Водозабор из эксплуатационной скважины приводит к понижению уровня.

В результате экспериментов была доказана высокая точность моделирования. Способ математического описания гидрогеологического объекта, разработанный Атрощенко И.О., имеет погрешность 15 %.

Еще одним примером описания гидродинамических процессов месторождения с помощью трехмерной математической модели является метод, разработанный

Малковым А.В. и Першиным И.М. [7]. В качестве объекта было изучено Георгиевское месторождение. В модели были описаны три пласта месторождения. Разработанная модель дает описание процесса геофильтрации с учетом воздействия на эксплуатируемый пласт и грунтовых вод, и нижнего водоносного пласта. Система уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial H_1(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{\eta_1^*} \left(k_{1,x} \frac{\partial^2 H_1(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{1,y} \frac{\partial^2 H_1(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{1,z} \frac{\partial^2 H_1(x, y, z, \tau)}{\partial z_1^2} \right); \\ \frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{\eta_2^*} \left(k_{2,x} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{2,y} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{2,z} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial z_2^2} \right) + \\ &+ V \cdot \delta(x_0, y_0); \\ \frac{\partial H_3(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{\eta_3^*} \left(k_{3,x} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{3,y} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{3,z} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial z_3^2} \right); \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$0 < x < L_x; 0 < y < L_y; 0 < z < L_{zi}; (i=1, 2, 3),$$

где i – порядковый номер пласта в срезе.

Для верхней границы верхнего пласта условия имеют вид:

$$\partial h_1(x, y, 0, \tau) / \partial z = 0 \quad (8)$$

Для нижней границы второго пласта условие будет иметь вид:

$$\partial H_2(x, y, L_{z_2}, \tau) / \partial z = 0. \quad (9)$$

Граничные условия по бокам моделируемой области будут иметь вид:

$$\begin{aligned} h_1(0, y, z, \tau) &= h_{1,0}; H_2(0, y, z, \tau) = H_{2,0}, \\ \partial h_1(L_x, y, z, \tau) / \partial x &= 0; \partial H_2(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $h_{1,0}, H_{2,0}$ – начальные состояния грунтовых вод пластов, м.

Точность соответствия рассмотренной модели реальному объекту можно оценить как высокую. Погрешность составила всего 14% [4].

Результаты (Results)

В качестве результатов данного исследования представлены геометрические и физические параметры рассмотренных выше объектов с привязкой к уравнениям, описывающим геофильтрационные модели. В Таблице представлены результаты моделирования месторождений КМВ.

Таблица – Результаты моделирования месторождений КМВ

Table – Results of modeling of KMV deposits

	Модель Дубогреева	Модель Атрощенко	Модель Малкова-Першина
Уравнения модели	(2)	(5)	(7)
Начальные и граничные условия	(3)	(6)	(8-10)
Коэффициенты фильтрации (м/сут.)	$k_x, k_y, k_z = 0,2$	$k_x, k_y, k_z = 0,2-0,4$	$k_x, k_y, k_z = 0,2$
Коэффициенты упругоёмкости (1/м)	$\mu_{1,x}^* = \mu_{2,x}^* = \mu_{3,x}^* = 2 \cdot 10^{-5}$	$\eta_{const} = 2 \cdot 10^{-7}$	$\eta_1^* = 1,5 \cdot 10^{-7}$ $\eta_2^* = 2 \cdot 10^{-7}$

			$\eta_3^*=2,25 \cdot 10^{-7}$
Используемая технология моделирования	2D	3D	3D
Учет перетекания между пластами	нет	нет	да
Кол-во пластов	3	1	3
Погрешность (%)	10-20	15	14

Рассмотренные модели имеют допустимую погрешность, определенную на основе сравнения значений модельного эксперимента с полученными на реальных объектах данными, и могут использоваться в решении данного класса задач.

При проведении экспериментов модели показали устойчивость, а время, потраченное на расчеты, было адекватно поставленной задаче.

Обсуждение (Discussion)

Все методы показали свою состоятельность при решении конкретных задач. Если в качестве объекта исследования выбрать месторождение с многокомпонентной структурой и большим набором параметров, то ее невозможно будет описать плоскопространственной моделью и сохранить необходимую точность верификации. Метод Дубогрея В.Ф. в таком случае будет не пригоден. Так же месторождение, имеющее множество пластов, невозможно описать моделью одного пласта. Месторождение, имеющее множество пластов с различными параметрами фильтрации, упругоёмкости и целостности, предполагает детальное рассмотрение пластов и учет их взаимного влияния. В этом случае неприменим метод Атрощенко О.И. Метод Малкова А.В. и Першина И.М. учитывает взаимодействия пластов, обладает возможностью построения трехмерной модели и подходит для описания объектов со структурой без пространственной неоднородности пластов.

Заключение (Conclusion)

Анализ рассмотренных методов моделирования месторождений предусматривал выявление оптимальной модели для решения поставленной задачи. Стало возможным определение критериев выбора того или иного метода. По результатам анализа, можно сформулировать общие положения по моделированию гидрогеологических объектов. Также на основе анализа полученных данных предоставляется возможность описания этапов по организации управления месторождением. Основные этапы формулируются следующим образом:

- начальный – получение исходных данных и задание цели разработки;
- промежуточный – выбор метода описания и его адаптация к реальному объекту;
- заключительный – реализация управления процессом эксплуатации гидрогеологического объекта.

При организации управления на объектах одного региона возникает возможность комплексного управления. Это позволит эффективно осуществлять контроль общей гидроминеральной базой Кавминвод [10].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hoefler T. A practical approach to the rating of barrier algorithms using the LogP model and Open-MPI. *Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel Processing Workshops*. 2005;562–569.
2. Бочеввер Ф.М. *Основы гидрологических расчетов*. Недра; 1965. 307 с.
3. *Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т.3: Методы современной теории автоматического управления*. МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2000. 748 с.
4. Малков А.В. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. *Научный мир*. 2012;474.
5. Мартиросян А.В. Моделирование системы управления с распределенными параметрами применительно к гидроминеральным ресурсам кавказских минеральных вод. *Университетская наука – региону: материалы 3-й ежегодной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых СКФУ*. Пятигорск: СКФУ. 2015;172.
6. Бегимов И. Структурное представление физически неоднородных систем. *Автоматика и телемеханика*. 1981;9:25–35.
7. Коваль В.А. *Спектральный метод анализа и синтеза распределенных управляемых систем*. Саратов: СГТУ; 1997. 191 с.
8. Рязанова В.В. Синтез системы управления гидролитосферным процессом. *Системный синтез и прикладная синергетика: материалы международной научной конференции*. 2009;415–422.
9. Атрощенко О.И. Синтез системы управления дебитом водозаборных скважин минеральной воды. *Вестник ИГЭУ*. 2008;3:1–5.
10. Першин И.М. Автоматизация производства и управления в перерабатывающей промышленности агропромышленного комплекса. *Материалы Всесоюзной научно-технической конференции (3-7 апр., 1989)*. 1989;80–82.

REFERENCES

1. Hoefler T. A practical approach to the rating of barrier algorithms using the LogP model and Open-MPI. *Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel Processing Workshops*. 2005;562–569.
2. Bochever F.M. Fundamentals of hydrological calculations. Nedra; 1965. 307 p. (In Russ)
3. *Methods of classical and modern theory of automatic control: Textbook in 3 volumes: Methods of modern theory of automatic control*. Bauman Moscow State Technical University; 2000.748 p. (In Russ)
4. Malkov A.V. Systems with distributed parameters. Analysis and synthesis. *Scientific World*. 2012;474. (In Russ)
5. Martirosyan A.V. Modeling of a control system with distributed parameters in relation to hydromineral resources of Caucasian mineral waters. *University Science – to the region: materials of the 3rd annual scientific and practical conference of teachers, students and young scientists of NCFU*. Pyatigorsk: NCFU. 2015;172. (In Russ)
6. Begimov I. Structural representation of physically inhomogeneous systems. *Automation and telemechanics*. 1981;9:25–35. (In Russ)
7. Koval V.A. *Spectralem ratio analysis et synthesis distribuit imperium ratio*. SSTU; 1997. 192 p. (In Russ)

8. Ryazanova V.V. Synthesis of the control system of the hydrolithospheric process. *System synthesis and applied synergetics: proceedings of the international scientific conference*. 2009;415–422. (In Russ)
9. Atroschenko O.I. Synthesis of the flow rate control system of mineral water intake wells. *IGEU Bulletin*. 2008;3:1–5. (In Russ)
10. Pershin I. M. Automation of production and management in the processing industry of the agro-industrial complex. *Materials of the All-Union Scientific and Technical Conference (3-7 Apr., 1989)*. 1989;80–82. (In Russ)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Калиберда Игорь Владимирович, Igor Vladimirovich Kaliberda, Head of the Заведующий лабораторией Института, Laboratory of the NCFU Institute (branch) in Северо-Кавказский федеральный университет Pyatigorsk, Pyatigorsk, Russian Federation. (филиал) в г. Пятигорске, Пятигорск, Российская Федерация.
e-mail: kaliberda.igor@ya.ru

Статья поступила в редакцию 13.08.2021; одобрена после рецензирования 05.10.2021; принята к публикации 13.10.2021.

The article was submitted 13.08.2021; approved after reviewing 05.10.2021; accepted for publication 13.10.2021.