

# Применение сетей Байеса при проектировании информационной системы «Месторождения минеральных вод»

К. В. Мартиросян<sup>1</sup>, А. Б. Чернышев<sup>1</sup>, А. В. Мартиросян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Северо-Кавказский федеральный университет

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Горный университет

<sup>1</sup>kvmartirosian@ncfu.ru, <sup>2</sup>martalex11@mail.ru

**Аннотация.** Разработка интеллектуальных сервисов, использующих вероятностную оценку целевых параметров на основе сетей Байеса, является одним из перспективных направлений в проектировании систем класса «Умное месторождение». В работе показаны возможности вероятностной оценки дебита скважины на основе анализа природных и экономических факторов. Обозначена целесообразность интеграции интеллектуальных сервисов с технологией «Регулятор» при проектировании информационной системы «Месторождения минеральных вод».

**Ключевые слова:** сети Байеса, интеллектуальные сервисы, информационная система, месторождения минеральных вод, дебит месторождения минеральных вод

## I. ВВЕДЕНИЕ

Организация контроля состояния месторождений минеральных вод в формате Индустрия 4.0 позволит не только автоматизировать процесс управления дебитом, но и сформировать основы актуального подхода к внедрению информационных технологий в данной предметной области. Технологии автоматизации контроля состояния месторождений, а также технологии управления дебитом скважин месторождений минеральных вод являются базовыми технологиями процесса извлечения ресурсов. Эти технологии можно автоматизировать, функциональность проекта информационной системы «Месторождения минеральных вод» разрабатывается более десяти лет. В ходе полевых испытаний прототипа проекта информационной системы было выявлено некоторое несоответствие результатов, получаемых на основе используемой модели месторождения реальным данным. Это связано с влиянием природных факторов на состояние месторождения. Применение сетей Байеса при проектировании информационной системы «Месторождения минеральных вод» позволит разработать математическую модель объекта, учитывающую влияние осадков на дебит. вероятность достижения определенной величины дебита скважины на основе данных о природных факторах. Такой подход повысит точность оценки дебита и обеспечит рациональное использование природного ресурса [1, 2].

Месторождения минеральных вод являются сложным природным объектом. Сложность объекта связана с его динамически меняющимся гидрогеологическим состоянием [3, 4]. Модель месторождения учитывает основные факторы, описывающие гидрогеологию, и позволяет оценить изменение дебита в процессе отбора

ресурса. Такие расчеты дают возможность прогнозирования контрольных значений объема извлечения минеральной воды. В то же время модель, используемая в настоящее время, не учитывает такие факторы, как наличие природных осадков, а также экономику процесса, определяющую аппетиты добывающей организации. В 2014 году объем продаж минеральной воды упал на 30 %, следовательно, можно было добывать меньше минеральной воды, дать восстановиться природному ресурсу [5, 6]. Указанный факт говорит о том, что экономические факторы также должны учитываться при прогнозировании контрольных показателей допустимых объемов извлечения ресурса [7, 8]. Предлагается учитывать природные и экономические факторы и использованием сети Байеса. Предлагаемая модель позволяет оценить вероятность влияния осадков и экономической конъюнктуры на итоговое состояние объекта. Такая модель вносит необходимые для более точной оценки уточнения в алгоритмы расчете дебита скважины, используемые в проекте математического обеспечения информационной системы «Месторождения минеральных вод» [9–10].

## II. МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Разработка проекта информационной системы «Месторождения минеральных вод» с применением информационных технологий в формате Индустрия 4.0 требует перехода к применению набора интеллектуальных сервисов, позволяющих оценивать состояние объекта с большей точностью, чем традиционные методы обработки данных. В настоящее время работу прототипа информационной системы «Месторождения минеральных вод» можно упрощенно представить в виде интерфейса, показанного на рис. 1.

Алгоритмы обработки данных используют информацию о месторождениях, которая взята из гидрогеологических отчетов. Результаты расчетов сравниваются с опытными данными. Как показано на рисунке, вычислительная схема использует гидрогеологические данные и данные о размерах месторождения. Итогом является оценка устойчивости процесса извлечения, а также выводы о рекомендуемых параметрах отбора ресурса.

Указанная вычислительная схема учитывает только гидрогеологию месторождения минеральных вод. Чтобы сделать результат расчета более точным, необходимо добавить влияние внешних факторов в используемую модель, сохранив в основе модели базовые алгоритмы оценки значений дебита.

Введем в расчет два внешних фактора: экономический и природный. Экономический фактор определяется текущей востребованностью минеральной воды на рынке и технологическими возможностями добывающей организации. Природный фактор определяется количеством осадков: засуха или дожди могут существенно изменить состояние месторождения.

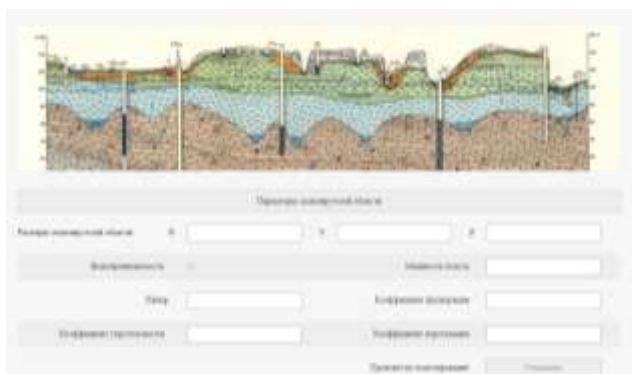


Рис. 1. Интерфейс прототипа информационной системы

Экономические факторы можно представить самостоятельной вероятностной моделью, это предмет отдельного исследования. Природные факторы определяются воздействием на месторождение осадков, наличием в окрестности месторождения строительных работ или иной техногенной нагрузки, а также рядом форс-мажорных факторов (пожар, наводнение, землетрясение).

Проведем моделирование состояния месторождения, подвергающегося воздействию экономических и природных факторов, что можно условно представить диаграммой Байеса, показанной на рис. 2. экономические и природные факторы носят вероятностный характер, соответственно, применение такого механизма моделирования, как сети Байеса, позволит не только оценить влияние указанных факторов на дебит, но и улучшать точность моделирования в ходе накопления статистики по работе предлагаемой вычислительной схемы.

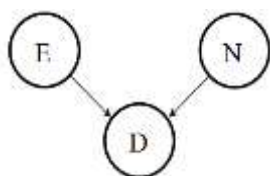


Рис. 2. Действие факторов E (экономика) и N (природа) на дебит месторождения минеральных вод D

В модели, построенной как сеть Байеса, представленной на рис. 3, учитываются только природные факторы. Общая вычислительная схема будет включать в себя экономические факторы, природные факторы, а также базовый алгоритм обработки гидрогеологических данных. Отметим важность учета природных данных: эти факторы не могут быть изменены посредством технологий, мы не можем управлять снегом или дождем, возможна только компенсация последствий избыточных осадков либо засушливой погоды. Кроме осадков, существуют форс-мажорные природные факторы: даже небольшое землетрясение может вызвать разлом породы, что изменит геометрию и гидрогеологию разреза. В результате воздействия осадков, внешних техногенных

факторов и изменений форм-факторов гидрогеологического разреза может измениться химическая формула минеральной воды, что является существенным изменением для потребителей ресурса.

В модели, представленной на рис. 3, показано взаимодействие природных факторов. Набор данных на входе расчетной схемы определяется сезоном S. В первых итерациях расчета использованы многолетние статистические наблюдения, далее схема проверяется в полевых условиях. После определения сезона рассматриваются данные по температурному режиму Ts и осадкам Y. Температурный режим определяет степень воздействия на ледники Is. Осадки представлены снегом Ys и дождем Yr. Отдельно учитываются форс-мажорные факторы FM. Результатом обработки данных являются скорректированные с учетом природного воздействия значения дебита скважины D.

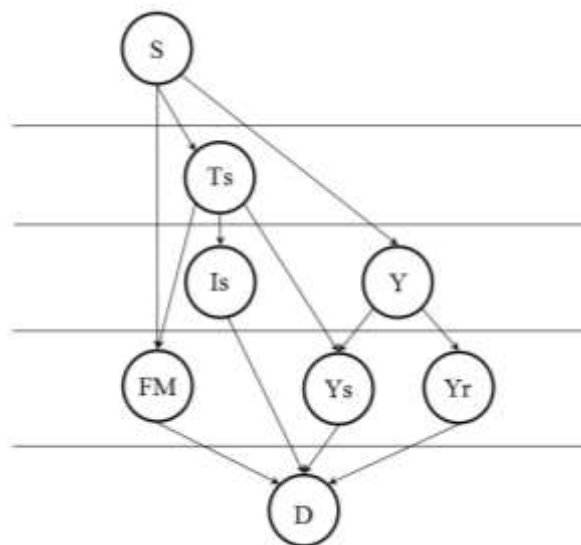


Рис. 3. Графическая модель воздействия природных факторов на дебит месторождения S – сезон (время года); FM – форс-мажорные обстоятельства; Ts – температура; Y – осадки; Is – ледники; Ys – снег; Yr – дождь; D – дебит

Работа вычислительной схемы, представленной на рис. 3, является компонентом математического обеспечения информационной системы «Месторождения минеральных вод». Применение вычислительной схемы на основе сетей Байеса позволяет использовать интеллектуальные сервисы в работе информационной системы и разработать проект в формате Индустрия 4.0. Интеллектуальные технологии ранее в проекте не применялись, предлагаемые алгоритмы могут быть внедрены и в базовую часть расчетов, но это более сложная задача.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результатом расчетов модели на рис. 3, является упрощенный пример, представленный ниже. В примере проводится расчет влияния осадков на значения дебита. Определим дебит в трех категориях: нормальный дебит (соответствующий результатам расчетов базовой вычислительной схемы), низкий и высокий дебит (соответствующие засушливой погоде либо избыточны осадкам). Берем статистические погодные наблюдения, определяем априорные вероятности указанных выше значений дебита (1):

$$\Pr(D_1) = 0,2; \Pr(D_2) = 0,5; \Pr(D_3) = 0,3, \quad (1)$$

где  $D_1$  - низкий дебит,  $D_2$  - нормальный дебит,  $D_3$  - высокий дебит.

Пусть текущий сезон – зима, тогда распределение вероятностей в случае снежной зимы можно представить в следующем виде:

$$\Pr(Y_1|D_1) = 0,3; \Pr(Y_1|D_2) = 0,4; \Pr(Y_1|D_3) = 0,8.$$

Пусть текущий сезон – лето, в случае избыточных осадков распределение вероятностей будет следующим:

$$\Pr(Y_2|D_1) = 0,5; \Pr(Y_2|D_2) = 0,7; \Pr(Y_2|D_3) = 0,9.$$

Возможна реализация сценария с недостаточным количеством осадков. Это может быть летняя засуха, бесснежная зима. Покажем, как будет представлено распределение вероятностей определенного состояния дебита скважины в данном случае:

$$\Pr(Y_3|D_1) = 0,8; \Pr(Y_3|D_2) = 0,25; \Pr(Y_3|D_3) = 0,1,$$

где  $D_i$  - событие,  $Y$  - свидетельство, поддерживающее гипотезу.

Составим таблицу, показывающую, каким образом осадки действуют на состояние дебита скважины (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. АПРИОРНЫЕ И УСЛОВНЫЕ ВЕРОЯТНОСТИ

Параметр	Дебит		
	Низкий	Нормальный	Высокий
Устойчивость	0,2	0,5	0,3
Снег	0,3	0,4	0,8
Дождь	0,05	0,7	0,9
Засуха	0,8	0,25	0,1

Используем формулу Байеса для определения вероятности реализации сценария с изменением дебита из-за воздействия природных факторов (2).

$$\Pr(D_j|Y_n) = \frac{\Pr(Y_n|D_j)\Pr(D_j)}{\sum_{i=1}^m \Pr(Y_n|D_i)\Pr(D_i)} \quad (2)$$

Работа вычислительной схемы, показанная на предлагаемом выше простом примере, дает вполне достоверные результаты, хорошо коррелирующие с реальными наблюдениями. Рассмотрим сценарий «Снежная зима». Рассчитаем апостериорные вероятности, используя формулу 1 и данные таблицы 1.

$$\Pr(D_1|Y_1) = \frac{\Pr(Y_1|D_1)\Pr(D_1)}{\sum_{i=1}^3 \Pr(Y_1|D_i)\Pr(D_i)} = 0,12$$

В результате сценарий «снежная зима» приведет к относительному увеличению вероятности события «нормальный дебит» и снизит вероятность события «низкий дебит». Таким образом, если фактор снежной зимы имеет вероятность 1, то наблюдается увеличение вероятности события «высокий дебит» и некоторое снижение вероятностей событий «нормальный дебит». Вероятность события «низкий дебит» упала почти в два раза.

В табл. 2 показан результат работы вычислительной схемы: значения апостериорных вероятностей событий «высокий дебит», «нормальный дебит», низкий дебит» при различных погодных сценариях.

ТАБЛИЦА 2. АПОСТЕРИОРНЫЕ ВЕРОЯТНОСТИ

Параметр	Дебит		
	Низкий	Нормальный	Высокий
Снег	0,12	0,4	0,48
Дождь	0,016	0,556	0,429
Засуха	0,508	0,397	0,095

В указанной простой вычислительной схеме использована статистика за десять лет. Расчет повторяется итерационно, в новой итерации десятилетний промежуток сдвигается вправо на один год и проводится новый расчет. Можно применять другую итерационную схему, рассчитывая условные вероятности по статистическим данным большого временного диапазона, после чего проводятся итерации по данным за предпоследний, последний и текущий год.

В обычной модели, используемой при расчете процессов, происходящих на месторождении, используется дифференциальное уравнение второго порядка, построенной по аналогии с уравнением теплопроводности. Это уравнение отражает переток воды между пластами. К уравнению составляются соответствующие начальные и граничные условия, уравнение модифицируется для водонесущего и прилегающего к нему пластов месторождения (3).

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial h_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= k_{i,x} \frac{\partial^2 h_i(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{i,y} \frac{\partial^2 h_i(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{i,z} \frac{\partial^2 h_i(x, y, z, \tau)}{\partial z^2}, \\ \frac{\partial H_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{s} \left( k_{2,x} \frac{\partial^2 H_i(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{2,y} \frac{\partial^2 H_i(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{2,z} \frac{\partial^2 H_i(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) \\ &+ V \cdot \delta(x_{0,j}, y_{0,j}, z_{0,j}) \\ 0 &< x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где:

$h_i$  – высота пласта горизонта 1;

$H_2$  – высота пласта горизонта 2;

$k_{i,x}, k_{i,y}, k_{i,z}$  – коэффициенты фильтрации;

$\eta_i$  – коэффициент проницаемости пласта с номером  $i$ .

Модель, представленная выше, является основой технологии «Регулятор». Но такая модель не отражает вероятностный характер природных и гидрогеологических процессов. Соответственно полагаем целесообразным интеграцию технологии «Регулятор» с вероятностной моделью, предложенной в данной работе. Большой объем данных добывающих предприятий и статистика по природным факторам позволяют сопоставить указанные массивы данных и указать априорные вероятности изменения дебита скважины в результате влияния природных факторов. Такие данные становятся базой расчета прогнозных значений уровня воды в скважине. Соответственно возможно строить массив данных, в котором различным вариациям факторов будут сопоставлены соответствующие изменения дебита. Такая модель является полезным дополнением к существующим схемам расчета дебита скважины.

Приведенный выше пример является схемой, по которой выполнялась разработка модели процессов, происходящий на месторождении. Реальная модель сложнее, учитывает больше параметров, точнее представляет сложный гидрогеологический объект. Результатом расчета дебита в соответствии с вероятностной моделью будут прогнозные значения дебита. Такой прогноз позволяет сделать предположения о допустимых параметрах добычи. В случае учета экономических факторов можно избежать рисков, возникающих в случае ухудшения экономической конъюнктуры. Можно заранее предложить возможный диапазон снижения добычи при снижении потребления минеральной воды. Также возможно варьировать параметры добычи при изменении погодных факторов.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования показано, что модель месторождения минеральных вод может быть дополнена компонентом, учитывающим влияние внешних факторов. Влияние таких внешних факторов, как природные и экономические факторы, носит вероятностный характер. Модель воздействия внешних факторов на состояние месторождения может быть разработана в формате диаграммы Байеса. Вычислительная схема, позволяющая оценить вероятность воздействия на дебит и относительную величину изменения дебита, построена как сеть Байеса. Тестирование схемы показало хорошую корреляцию с опытными данными.

Приведенная выше модель является простым примером, показывающим общий смысл моделирования процессов с применением сетей Байеса. Для разработки модели, в полном объеме отражающей указанные процессы, необходимо применение более сложных диаграмм. Каждый элемент состояния системы может быть представлен самостоятельной диаграммой. Также необходимо учитывать такие факторы, как гидрогеология пласта, изменение состояния месторождения в ходе его эксплуатации. Многие сложные процессы, происходящие на месторождениях минеральных вод в процессе их эксплуатации, не могут быть представлены в рамках небольшой статьи. В данном исследовании показан общий принцип моделирования, позволяющий получить достаточно точные результаты.

В настоящее время добывающие предприятия при эксплуатации месторождений минеральных вод используют традиционные технологии, которые не менялись с 30-х годов прошлого века. Переход к современным методам автоматизации процессов добычи, использующим смарт-технологии, существенным образом упростит подход к определению допустимых режимов эксплуатации ресурсов. Внедрение смарт-технологий, разработка систем класса «Умное месторождение» потребует перехода к соответствующим алгоритмам, составляющим основу математического обеспечения интеллектуальных сервисов систем автоматизации.

Предлагаемый подход является одним из возможных способов организации таких интеллектуальных сервисов. Вероятностные модели на основе сетей Байеса дают возможность расчета влияния экономических и

природных факторов. Такие модели могут использоваться и при определении влияния базовых параметров добычи с учетом того, что накоплено большое количество статистики по режимам эксплуатации месторождений, такие модели могут быть весьма точными, и позволят перейти к организации системы класса «умное месторождение». Проведенные исследования позволяют перейти к разработке новой версии проекта информационной системы «Месторождения минеральных вод». Математическое обеспечение проекта включает в себя алгоритмы, позволяющие выполнять оценку влияния внешних факторов. Также в математическое обеспечение входит базовая схема расчета гидрогеологических процессов, построенная с применением технологии «Регулятор». Вероятностная оценка степени влияния внешних факторов на величину дебита скважины дополняет базовую вычислительную схему и позволяет получить более точный результат. Проект информационной системы разрабатывается в формате Индустрия 4.0. и включает себя интеллектуальные сервисы. Результатом внедрения информационной системы «Месторождения минеральных вод» будет организация рационального природопользования в регионе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Dashko R.E., Romanov I.S. Forecasting of mining and geological processes based on the analysis of the underground space of the Kupol deposit as a multicomponent system (Chukotka Autonomous Region Anadyr district). *Journal of Mining Institute*, 2021, vol.247, no.1, pp.20-32.
- [2] Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Spatial distributed control system of temperature field: synthesis and modeling. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2021, vol.16, no.14, pp.1491-1506.
- [3] Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Development of a spatial-distributed control system for preparation of pulse gas. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM*, 2020, vol.2, no.1, pp. 475-482.
- [4] Korotenko V.A., Grachev S.I., Kushakova N.P., Mulyavin S.F. Assessment of the influence of water saturation and capillary pressure gradients on size formation of two-phase filtration zone in compressed low-permeable reservoir. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol.245, pp.569-581.
- [5] Kukharova T.V., Utkin V.A., Pershin I.M. Modeling of a Decision Support System for a Psychiatrist Based on the Dynamics of Electrical Conductivity Parameters. 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), pp. 975-978.
- [6] Meshkov A.A., Kazanin O.I., Sidorenko A.A. Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the kuzbass mines. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol.249, no.5, pp.342-350.
- [7] Pershin I.M., Kukharova T.V., Tsapleva V.V. Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, 2021, vol.1728, no.1, pp.1-6.
- [8] Sidorenko A.A., Dmitriev P.N., Sirenko Y.G. Predicting Methane Emissions from Multiple Gas-Bearing Coal Seams to Longwall Goafs at Russian Mines. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2021, vol.16, no.8, pp.851-857.
- [9] Sidorenko A.A., Sidorenko S.A., Ivanov V.V. Numerical modelling of multiple-seam coal mining at the Taldinskaya-Zapadnaya-2 mine. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2021, vol.19, no.5, pp.568-574.
- [10] Ilyushin Y.V., Fetisov V.A. Experience of virtual commissioning of a process control system for the production of high-paraffin oil. *Sci Rep* 12, 2022, no.12, 18415.