

ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕДР ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Владов Ю.Р.^{1,2}, Нестеренко М.Ю.^{1,2}, Владова А.Ю.^{3,4}

¹Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН

²Оренбургский государственный университет

³Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

⁴Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации

urvladov@rambler.ru, n_mu@mail.ru, kidlemon@yandex.com

Аннотация: Предложена технология, необходимая при мониторинге геофизических процессов. Проанализированы известные технические решения в этой области и рассмотрены основные операции. На примере модельной зоны Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения технология реализована и определены технико-экономические преимущества.

Ключевые слова: технология мониторинга, геодинамическое состояние, недра месторождения углеводородного сырья.

Введение

Технология относится к области геофизических процессов, ее области применения: геодинамическое районирование, обнаружение и трассирование тектонических нарушений в верхней части земной коры, выявление опасных геодинамических процессов, выбор рационального режима эксплуатации разрабатываемых месторождений углеводородов. Преимущественная область применения – мониторинг геодинамического состояния (ГДС) недр эксплуатируемого месторождения углеводородного сырья (УВС).

Рассмотрим выявленные технические решения в этой области. Известен способ обнаружения литосферных зон переменной геодинамической активности, основанный на анализе данных ионосферных спутниковых измерений магнитной и электрической компонент поля низкочастотных излучений околоземной плазмы с последующим исключением из рассмотрения традиционно возмущенных областей и выделением зон устойчивого наблюдения индуцированных излучений ионосферной плазмы, причем одновременно фиксируют плотность потока электронов низких энергий и температуру окружающей спутник околоземной плазмы, затем выполняют корреляционный анализ для всех сочетаний зарегистрированных параметров, сравнивают полученный результат с данными геолого-геофизического картирования литосферной зоны, расположенной в зоне проекции на Землю орбиты спутника и делают вывод об обнаружении литосферных зон переменной геодинамической активности (см. патент РФ RU 2158942, МПК7 G01V 3/12, 29.10.1999).

Известен способ оценки влияния факторов на безопасность эксплуатации подземного хранилища газа (ПХГ) в пористом пласте, предназначенный для определения влияния различных природно-техногенных процессов на безопасность эксплуатации ПХГ. Способ включает создание полигона и проведение на нем комплексного мониторинга, построение карты по его результатам и прогнозирование возникновения чрезвычайных природно-техногенных событий, причем комплексный мониторинг проводят на региональном и локальном этапах по аэрокосмическому, деформационному, геофизическому, гидрогеологическому и флюидодинамическому блокам с использованием различной пространственно-временной детальности измерений, затем разрабатывают классификацию критериальных показателей для оценки риска и сравнивают рассчитанные показатели с критериальными, оценивают интенсивность проявления опасных техногенно-индуцированных процессов по единому суммарному коэффициенту состояния ПХГ, который сравнивают с предварительно рассчитанным критериальным коэффициентом и строят итоговую карту ранжирования территории по степени опасности (см. патент РФ № 2423306, МПК: B65G 5/00; G01V 11/00; E21B 47/00, 24.02.2010).

Более близким к предложенной технологии является способ идентификации зон опасности сооружений, относящийся к области строительства и эксплуатации подземных и наземных сооружений и предназначенный для изучения строения и современной геодинамики земной коры с осуществлением прогноза степени активизации деформационных процессов при поиске, разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Способ предусматривает проведение наземных и/или спутниковых повторных геодезических измерений земной поверхности в

наблюдательных пунктах с одновременным измерением вертикальных и горизонтальных смещений, далее определяют амплитуды вертикальных и горизонтальных аномальных смещений земной поверхности, определяют величины относительных вертикальных и горизонтальных деформаций, по величинам которых судят об опасности для подземного или наземного сооружения, расположенного на этом участке земной поверхности (см. патент на изобретение № 2467359, G01V 9/00, 16.06.2011).

Общий недостаток известных технических решений – нельзя осуществить мониторинг ГДС. Поставлена цель - повышение эффективности мониторинга ГДС недр эксплуатируемого месторождения УВ. Методологическая основа достижения цели - методы теории управления, аналитической идентификации состояния природно-техногенных объектов [1], а при построении их моделей состояния – теория агрегирования информации на базе аналитических [2] и мультиграфовых [3, 4] моделей, решения интеллектуальных задач в области управления состоянием крупномасштабных объектов [5].

1 Операции технологии

Разработанная технология мониторинга по авторскому патенту на изобретение № 2575469 RU, МПК G01V 9/00; G01V 1/28. Способ определения ГДА недр разрабатываемого месторождения УВ. Оpubл. 20.02.16, Бюл. № 5. 14 с.) отображена на функциональной схеме (рис. 1).

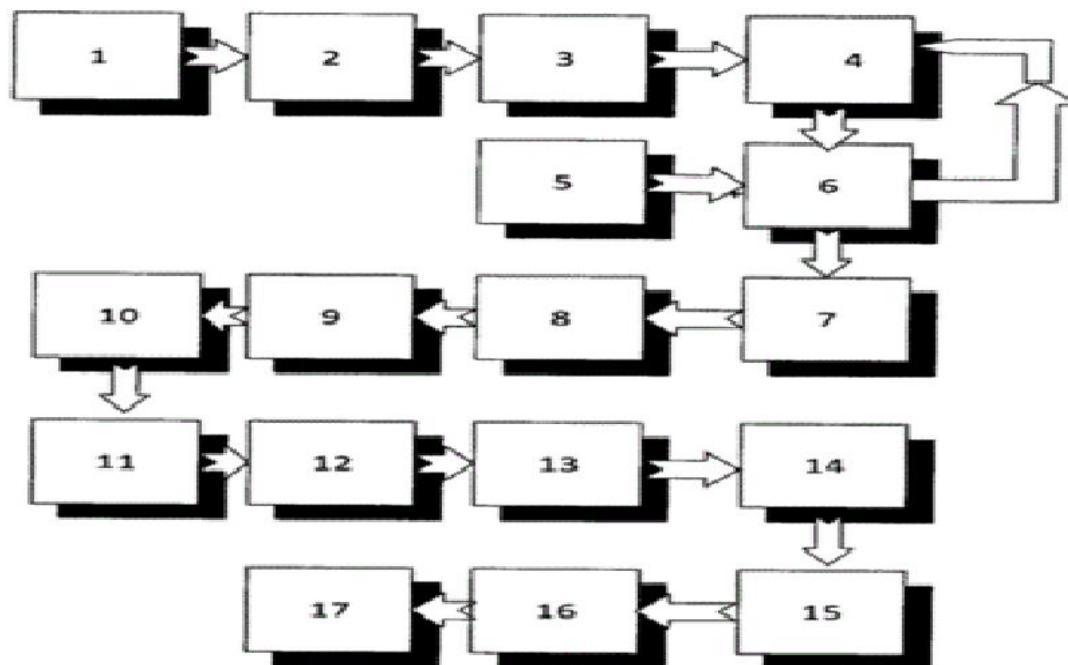


Рис. 1 Функциональная схема с основными операциями разработанной технологии

Разработанная технология включает в себя следующие основные операции: устанавливают

- 1) сейсмические станции;
- 2) регистрируют с их помощью сейсмические сигналы;
- 3) объединяют сейсмические станции в сейсмологическую сеть из расчета не менее трех станций на 10000 км²;
- 4) интегрируют данные о сейсмической активности недр разрабатываемого месторождения УВС с его окрестностью от техногенно-природных событий;
- 5) задают пороговое значение выделившейся сейсмической энергии на 10000 км²;
- 6) сравнивают интегрированные данные с заданным пороговым значением;
- 7) если порог не превышен, то продолжают интегрировать данные, а если превышен, то проводят геодинамическое районирование недр разрабатываемого месторождения УВС с его окрестностями с разрешением не более 100 км²;
- 8) выделяют участки с аномально высокой геодинамической активностью (ГДА);

- 9) реконфигурируют сейсмологическую сеть на участках с аномально высокой ГДА за счет добавления на каждом не менее двух мобильных сейсмических станций с их размещением на расстоянии от 3 до 5 км друг от друга;
- 10) находят сейсмически активные структуры геологической среды разрабатываемого месторождения УВС;
- 11) с учетом найденных сейсмически активных структур определяют деформации земной поверхности на выделенных участках месторождения УВС;
- 12) идентифицируют величину ГДА каждого выделенного участка по агрегированной модели с использованием нормированных частных показателей и соответствующих весовых коэффициентов;
- 13) выбирают частные показатели ГДА из предложенного списка параметров. Выбор осуществляют с учетом особенностей разрабатываемого месторождения УВС;
- 14) присваивают полученные величины ГДА выделенным участкам;
- 15) строят вектор X_{otn} , компонентами которого берут полученные значения ГДА выделенных участков;
- 16) определяют модуль нормированного по количеству выделенных участков вектора;
- 17) по величине модуля вектора $|X_{otn}|$ мониторируют в диапазоне от 0 до 1 геодинамическое состояние недр месторождения УВС.

2 Выполнение операций технологии

Технологию мониторинга геодинамического состояния недр эксплуатируемого месторождения УВС реализуют следующим образом. Устанавливают (1) сейсмические станции и регистрируют (2) с их помощью сейсмические сигналы, объединяют (3) сейсмические станции в сейсмологическую сеть из расчета не менее трех станций на 10000 км², интегрируют (4) данные о сейсмической активности недр разрабатываемого месторождения углеводородов с его окрестностями, задают (5) пороговое значение выделившейся сейсмической энергии на 10000 км², сравнивают (6) интегрированные данные с заданным пороговым значением, и если порог не превышен, то продолжают интегрировать данные, а если превышен, то проводят (7) геодинамическое районирование территории разрабатываемого месторождения УВС с его окрестностями с разрешением не более 100 км², выделяют (8) участки с аномально высокой ГДА, на которых реконфигурируют (9) сейсмологическую сеть за счет добавления на каждом не менее двух сейсмических станций с их размещением на расстоянии от 3 до 5 км друг от друга, находят (10) сейсмически активные структуры геологической среды разрабатываемого месторождения УВ и с их учетом определяют (11) деформации земной поверхности на выделенных участках месторождения, мониторируют (12) величину ГДА x_j каждого выделенного участка по одной из агрегированных моделей, например, аддитивной (1), с использованием нормированных частных показателей $r_{i\ otn}$ и соответствующих весовых коэффициентов a_i :

$$(1) \quad x_j = \sum a_i \cdot r_{i\ otn} \cdot$$

В наиболее ответственных случаях строят несколько видов агрегированных моделей, а затем по критерию минимума среднего риска находят из них оптимальную. Выбирают (13) частные показатели ГДА из следующего перечня: глубина до поверхности кристаллического фундамента; частота тектонических нарушений; частота сети пробуренных скважин; глубина залегания продуктивных пластов; мощность пластов; площадь месторождения; величина падения пластового давления; пористость вмещающих пород; прочность пород; наличие и количество гидроразрывов пластов; объем закаченной жидкости; количество зарегистрированных сейсмических событий; суммарная выделившаяся сейсмическая энергия и величина измеренной деформации земной поверхности. При выборе частных показателей ГДА учитывают особенности эксплуатируемого месторождения УВС.

Затем присваивают (14) найденные величины ГДА выделенным участкам и строят (15) вектор, в качестве компонентов которого берут полученные значения ГДА выделенных участков. После чего определяют (16) модуль вектора, нормированного по количеству выделенных участков l по соотношению (2):

$$(2) \quad |X_{otn}| = \sqrt{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_l^2)} / l$$

где l - количество выделенных участков с аномально высокой геодинамической активностью;

x_j - величина геодинамической активности i - ого выделенного участка.

По величине модуля $|X_{om}|$ вектора мониторируют (17) в диапазоне от 0 до 1 геодинамическое состояние недр эксплуатируемого месторождения УВС с его окрестностями.

3 Обсуждение результатов мониторинга недр модельной зоны

В качестве примера рассмотрим мониторинг геодинамического состояния недр модельной зоны площадью 500 км² эксплуатируемого Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения (ОНГКМ) (рис. 2). С учетом требований по проведению геодинамических мониторингов на разрабатываемых месторождениях углеводородного сырья спроектирована сейсмологическая сеть из сейсмических станций «Газ-сейсмика», состоящая из стационарных и передвижных сейсмических станций. Комплект оборудования каждой стационарной сейсмической станции включает в себя следующие блоки и системы: два комплекта сейсмометров, установленных в специально обустроенных бункерах глубиной 3-6 м; блок сбора и выделения сейсмического сигнала; GNSS-приемник, для привязки точного времени; компьютер сбора и обработки данных и система питания.

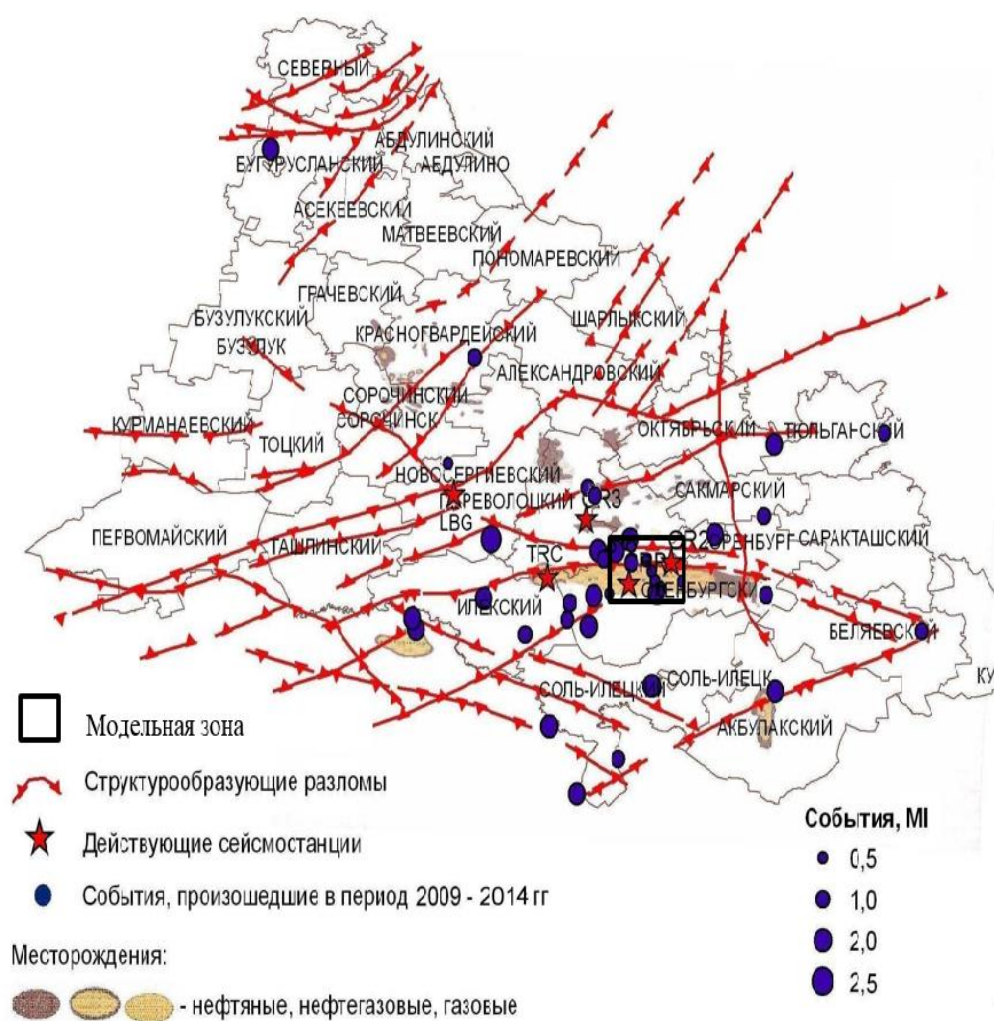


Рис. 2. Схема Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения и модельной зоны

Сейсмические станции объединены в сейсмологическая сеть, с помощью которой регистрируют сейсмические события (рис. 3).

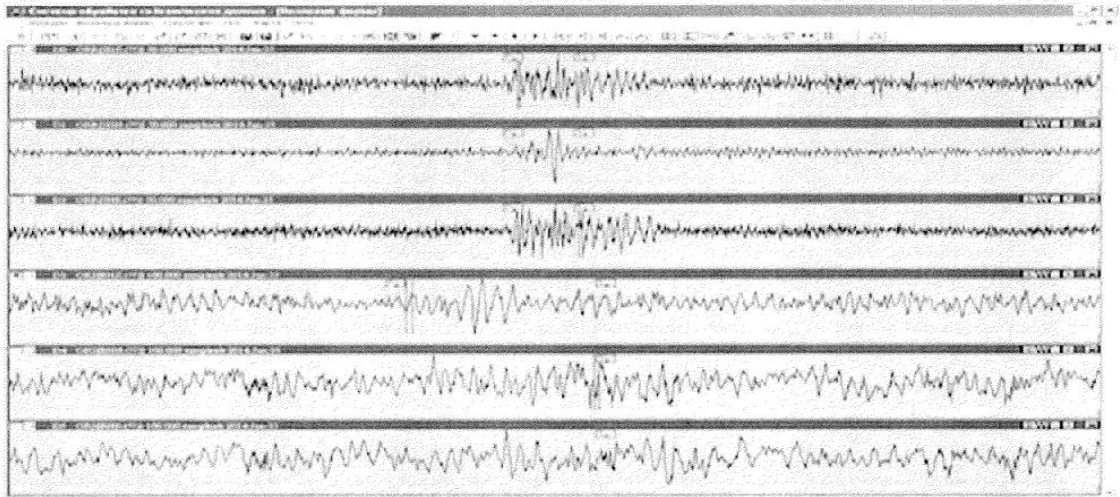


Рис. 3. Фрагмент сейсмограммы сейсмического события

Проинтегрированы за пятилетний период данные о сейсмической активности недр разрабатываемого месторождения УВ с его окрестностями. За пятилетний период накопленная выделившаяся сейсмическая энергия составила $10^{7.1}$ Дж. После чего определена плотность выделившейся сейсмической энергии, для модельной зоны ОНГКМ она составила $2,52 \cdot 10^4$ Дж/км². При заданном в первом случае пороговом значении плотности выделившейся сейсмической энергии, равном $2 \cdot 10^5$ Дж/км², необходимо продолжать процесс интеграции сейсмических данных, а во втором случае - при заданном пороговом значении $2 \cdot 10^4$ Дж/км², плотность выделившейся сейсмической энергии превышает выбранное пороговое значение. Поэтому проведено геодинамическое районирование модельной зоны ОНГКМ с разрешением один км² с выделением двух участков с аномально высокой геодинамической активностью, на которых сейсмологическую сеть реконфигурировали за счет добавления мобильных сейсмических станций. При этом выделена одна сейсмически активная геологическая структура, которая, в частности, входит в Соль-Илецкий свод, в пределах которого регистрируется более 60 % всех сейсмических событий разрабатываемого ОНГКМ. Определены деформации земной поверхности на выделенных участках с использованием сети из GNSS-станций [6] с достигнутой точностью измерений в пределах 7 мм.

Идентифицированы для каждого из двух выделенных участков величины геодинамической активности x_1 и x_2 , причем для их определения использованы первые пять нормированных частных показателей из приведенного перечня. Результаты идентификации, следующие: $x_1 = 0,31$, а $x_2 = 0,29$. Далее построен двухкомпонентный вектор и определен его модуль по соотношению (2). Его величина, равная 0,30, достаточно полно характеризует геодинамическое состояние недр модельной зоны с ее окрестностью эксплуатируемого ОНГКМ.

4 Техничко-экономические преимущества

Определим технико-экономические преимущества на основе интегрального экономического показателя, в качестве которого при сравнении предложенной технологии со способом на основе геометрического нивелирования (см., например, Инструкция по производству маркшейдерских работ, утвержденная постановлением Госгортехнадзора России № 73 от 06.06.2003) служат затраты на их реализацию. Они выражаются следующей формулой:

$$(3) \quad I_{ie} = K + Z_e,$$

где K - единовременные капитальные затраты (на приобретение, транспортировку, монтаж, а также сопутствующие затраты);

Z_e - затраты на эксплуатацию за все время работы изделия.

Интегральный экономический показатель реализации предложенной технологии мониторинга ГДС недр эксплуатируемого месторождения УВС с площадью до 10000 км² в сравнении со способом геометрического нивелирования в течение 10 лет оцениваем следующим образом:

- стоимость реализации в первые 5 лет определяется стоимостью проекта сейсмологического мониторинга (оценивается в 1 млн руб.), стоимостью оборудования и бункера сейсмостанции (3 станции по 0,6 млн руб.). Сюда включаются также эксплуатационные расходы (обслуживание 3 станций по 0,3 млн руб. каждая в течение 5 лет);

- стоимость реализации в последующие 5 лет (при выявлении в первые пять лет геодинамически активных зон) оценивается стоимостью оборудования (GNSS-приемники - 1 млн руб), эксплуатационными расходами (обслуживание GNSS-станций 0.4 млн руб. в год в течение 5 лет);
- стоимость реализации в последующие 5 лет (при отсутствии в течении первых пяти лет геодинамической активности недр) оценивается эксплуатационными расходами (обслуживание 3 станций по 0,3 млн руб. каждая в течение 5 лет). Верхняя оценка интегрального экономического показателя при достаточной геодинамической активности недр составит 9,8 млн руб.

Интегральный экономический показатель проведения мониторинга по способу геометрического нивелирования, согласно Инструкции по производству маркшейдерских работ, оцениваем следующим образом: стоимость реализации в первые 5 лет определяется стоимостью проекта проведения мониторинга (оценивается в 1 млн руб), стоимостью оборудования (3 нивелира II класса точности по 0,5 млн руб.) и эксплуатационными расходами (снятие параметров 800 точек в год по 0,003 млн руб. каждая в течение 10 лет).

Оценка интегрального экономического показателя мониторинга по способу геометрического нивелирования составит 26,5 млн руб. Тогда, коэффициент эффективности предложенной технологии мониторинга, вычисляемый как отношение интегральных экономических показателей двух способов составит 2,7.

Выводы

Разработанная технология мониторинга ГДС недр эксплуатируемого месторождения УВС устраняет недостаток известных способов повышения надежности и безопасности сооружений. Как видно из описания, технология содержит ряд операций, выполнение которых необходимо и достаточно для эффективного мониторинга геодинамического состояния недр разрабатываемого месторождения УВС с его окрестностью. Исследования, проведенные на модельной зоне ОНГКМ, подтверждают значимость каждой операции технологии и ее высокую эффективность в целом.

Статья написана с использованием результатов, полученных при выполнении проекта «Технологии интеллектуального управления состоянием техногенных объектов», поддержанного грантами Российского фонда фундаментальных исследований по приоритетному направлению «информационно-телекоммуникационные системы». Важной составляющей проблемы является разработка технологий управления на основе ПИД-контроллеров с прогнозной составляющей и априорно известными [7] и неизвестными [8] динамическими параметрами.

Литература

1. *Владов Ю.Р.* Построение и моделирование систем интеллектуального управления состоянием техногенных объектов: Монография / Ю.Р. Владов, А.Ю. Владова // Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2013. - 243 с.
2. *Владов Ю.Р.* Математические модели и методы идентификации состояния техногенных объектов / Компьютерная интеграция производства и ИПИ – технологии // Сборник материалов V Всероссийской конференции. – Оренбург: ИП Осиночкин Я.В. 2011. – С. 158-165.
3. *Владова А.Ю.* Непараметрическая идентификация множества состояний оболочковых технических объектов / А.Ю. Владова, Ю.Р. Владов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2011. № 4 (82). - С. 9-12.
4. *Владова А.Ю.* Марковская идентификация коррозионных состояний трубопроводов / А.Ю. Владова Ю.Р. Владов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2009. № 7. - С. 40-48.
5. Крупномасштабные системы: Моделирование развития и функционирования [Отв. ред. А.Д. Цвиркун, В.Н. Бурков]. – М.: ИПУ, 1990. - 103 с.
6. *Нестеренко М.Ю.* Влияние переотраженного сигнала на точность глобальных навигационных систем при мониторинге деформаций земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов / М.Ю. Нестеренко, А.В. Цвяк, Ю.Р. Владов // Успехи современного естествознания. 2016. № 9. - С. 143-147.
7. *Vladov Yu.R.* Control Signals of a Predictive Industrial PID Controller / Yu.R. Vladov, A.Yu. Vladova // Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, No. 5. - P. 399–402.

8. *Vladov Yu.R.* Two-stage workflow control with a predictive component / Yu.R. Vladov, A.Yu.Vladova // 17th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization CAO-2018: Yekaterinburg, Russia, 15-19 Oktober 2018. IFAC PapersOnLine, Vol. 51, Issue 32, 2018. - P. 712-716.