

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НЕФТИ И ГАЗА

Научное сетевое издание

Институт проблем нефти и газа Российской академии наук



ACTUAL PROBLEMS OF OIL AND GAS

Scientific online journal

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Научное сетевое издание «Актуальные проблемы нефти и газа»* издается с 2010 г.

Учредитель издания – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа РАН

Главный редактор

Абукова Лейла Азретовна – д. г.-м. н., директор Института проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

Редакционный совет

Дмитриевский А.Н., академик РАН, ИПНГ РАН, Москва, Россия

Абдуллаев Г.С., д. г.-м. н., АО «ИГИРНИГМ», Ташкент, Узбекистан

Богоявленский В.И., чл.-кор. РАН, ИПНГ РАН, Москва, Россия

Григорьев Б.А., чл.-кор. РАН, «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, Россия

Ермилов О.М., академик РАН, Ямало-Ненецкий филиал ИНГГ СО РАН, Тюмень, Россия

Конторович В.А., чл.-кор. РАН, ИНГГ СО РАН, Новосибирск, Россия

Махнач А.А., академик НАН РБ, РУП «Научно-производственный центр по геологии», Минск, Беларусь

Салаватов Т.Ш., чл.-кор. АЗНАН, АГУНП, Баку, Азербайджан

Скоробогатов В.А., д. г.-м. наук, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, Россия

Редакционная коллегия

Закиров Э.С., зам. гл. редактора, д. т. н., ИПНГ РАН, Москва, Россия

Баганова М.Н., к. т. н., ИПНГ РАН, Москва, Россия

Баталин О.Ю., к. ф.-м. н., ИПНГ РАН, Москва, Россия

Еремин Н.А., д. т. н., ИПНГ РАН, Москва, Россия

Коваленко К.В., д. г.-м. н., ИПНГ РАН, Москва, Россия

Кузин А.М., к. г.-м. н., ИПНГ РАН, Москва, Россия

Максимов В.М., д. т. н., ИПНГ РАН, Москва, Россия

Поднек В.Э., к. ф.-м. наук, ИПНГ РАН, Москва, Россия

Селиверстова М.Е., зав. редакцией, ИПНГ РАН, Москва, Россия

Сумин А.М., к. ю. н., ИПНГ РАН, Москва, Россия

Шустер В.Л., д. г.-м. н., ИПНГ РАН, Москва, Россия

Редакция

Селиверстова М.Е., Чигарев В.Б., Дацко Т.Г., Дацко А.В.

Адрес редакции: 119333, РФ, Москва,

ул. Губкина, д. 3

Тел. редакции: 8(499)135-71-81, 8(499)135-60-51

E-mail: oilgasjournal@ipng.ru

Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-67021 от 16 сентября 2016 года.

Издание открытого доступа.

Все статьи рецензируются и публикуются бесплатно.

Периодичность выпуска издания – 4 раза в год.

Сайт: <http://oilgasjournal.ru/index.html>

Издание индексируется в РИНЦ.

*Предыдущее название – «Георесурсы, геознергетика, геополитика», свид. о рег. Эл № ФС77-36038 от 23.04.2009 г.

Содержание

Фундаментальные проблемы геологии, геофизики и геохимии нефти и газа

Кушнир Д.Г. Гипербазиты как фактор геодинамики по результатам исследований на Таймырском геофизическом полигоне

3

Новые методы и технологии изучения геологической среды нефтегазоносных бассейнов

Скибицкая Н.А., Бурханова И.О., Кузьмин В.А., Большаков М.Н., Марутян О.О., Самохвалов Н.И.

Усовершенствование петрофизической модели продуктивных отложений Вуктыльского месторождения

28

Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А., Большаков М.Н., Марутян О.О., Доманова Е.Г. Совершенствование аспирационного термомассометрического метода определения форм и видов связи воды, насыщающей породу

39

Шулейкин В.Н., Куповых Г.В. Оценка работоспособности атмосферно-электрического механизма лозоходства

51

Шустер В.Л. Методический подход к прогнозу в нефтегазоносных бассейнах зон, благоприятных для формирования неантиклинальных ловушек

64

Новые технологии и подходы к разработке нефтяных и газовых месторождений

Демьяновский В.Б., Каушанский Д.А., Бакиров Н.Р.

Изучение деструкции гелей полимерно-гелевой системы на основе реагента «Темпоскрин-Плюс»

72

Экологический мониторинг и промышленная безопасность нефтегазовых объектов

Корниенко С.Г. Информативность космических снимков сверхвысокого разрешения в задачах мониторинга влажности тундрового покрова

82

Проблемы стратегического планирования в нефтегазовой отрасли

Чигарев Б.Н. Анализ использования индикаторов оценки энергетической безопасности в научных публикациях

96

Чигарев Б.Н. Анализ тематики публикаций базы Web of Science за 2019–2020 годы по вопросам чистой энергетики

111

Scientific online journal *Actual Problems of Oil and Gas*.
Published since 2010

Founder: Oil and Gas Research Institute of the Russian
Academy of Sciences (OGRI RAS)

Editor-in-Chief

Abukova Leila A. – D.Sc. (Geol.-Mineral.), Director of
OGRI RAS, Moscow, Russia

Editorial Council

Dmitrievsky A.N., Academician of the RAS, OGRI RAS,
Moscow, Russia

Abdullaev G.S., D.Sc. (Geol.-Mineral.), IGIRNIGM LLC,
Tashkent, Uzbekistan

Bogoyavlensky V.I., Corr. Member of the RAS, OGRI RAS,
Moscow, Russia

Grigoriev B.A., Corr. Member of the RAS, Gazprom
VNIIGAZ LLC, Moscow, Russia

Ermilov O.M., Academician of the RAS, Yamal-NeNETs
Division of IPGG SB RAS, Tyumen, Russia

Kontorovich V.A., Corr. Member of the RAS, IPGG SB
RAS, Novosibirsk, Russia

Makhnach A.A., Academician of the NAS of Belarus,
Scientific-Productional Centre for Geology, Minsk,
Belarus

Salavatov T.Sh., Corr. Member of the NAS of Azerbaijan,
ASOIU, Baku, Azerbaijan

Skorobogatov V.A., D.Sc. (Geol.-Mineral.), Gazprom
VNIIGAZ LLC, Moscow, Russia

Editorial Board

Zakirov E.S., Deputy Editor-in-Chief, D.Sc. (Eng.), OGRI
RAS, Moscow, Russia

Baganova M.N., Ph.D. (Eng.), OGRI RAS, Moscow, Russia

Batalin O.Yu., Ph.D. (Phys.-Math.), OGRI RAS, Moscow,
Russia

Eremine N.A., D.Sc. (Eng.), OGRI RAS, Moscow, Russia

Kovalenko K.V., D.Sc. (Geol.-Mineral.), OGRI RAS,
Moscow, Russia

Kouzin A.M., Ph.D. (Geol.-Mineral.), OGRI RAS, Moscow,
Russia

Maksimov V.M., D.Sc. (Eng.), OGRI RAS, Moscow, Russia

Podnek V.E., Ph.D. (Phys.-Math.), OGRI RAS, Moscow,
Russia

Seliverstova M.E., Managing Editor, OGRI RAS, Moscow,
Russia

Sumin A.M., Ph.D. (Law), OGRI RAS, Moscow, Russia

Shuster V.L., D.Sc. (Geol.-Mineral.), OGRI RAS, Moscow,
Russia

Editorial Staff

**Seliverstova M.E., Chigarev V.B., Datsko T.G.,
Datsko A.V.**

Editorial address: 3, Gubkin Street, Moscow,

Russian Federation, 119333

Phone: 8(499)135-71-81, 8(499)135-60-51

E-mail: oilgasjournal@ipng.ru

Registration certificate El No. FS77-67021
from 16 September 2016.

An open access journal.

No fee for publication and for peer-review.

Publication frequency: 4 issues per year.

Site: <http://oilgasjournal.ru/index.html>

Indexed in the Russian Science Citation Index.

*Previous title – *Georesources, Geoenergetics, Geopolitics*,
reg. sert. El. No. FS77-36038 from 23.04.2009.

Contents

Fundamental issues of geology, geophysics and geochemistry of oil and gas

- Kushnir D.G.** Hyperbasites as a factor of geodynamics:
the results of the surveys at the Taimyr geophysical site **3**

New methods and technologies of studying the geological environment of oil and gas bearing basins

- Skibitskaya N.A., Burkhanova I.O., Kuzmin V.A., Bolshakov
M.N., Marutyan O.O., Samokhvalov N.I.** Improved
petrophysical model for the productive layers of the Vuktyl
field **28**

- Skibitskaya N.A., Kuzmin V.A., Bolshakov M.N., Marutyan
O.O., Domanova E.G.** Improvement of aspiration thermal
massometry method for determination of forms and types
of water binding in rocks **39**

- Shuleikin V.N., Kupovykh G.V.** Performance assessment of
the atmospheric electric dowsing mechanism **51**

- Shuster V.L.** Methodical approach to forecasting zones in oil
and gas bearing basins favorable for the formation of non-
anticlinal traps **64**

New technologies and approaches to oil and gas field development

- Demyanovsky V.B., Kaushansky D.A., Bakirov N.R.** Study of
the degradation of the gels of polymer-gel system based on
Temposcreen-Plus reagent **72**

Environmental monitoring and industrial security of oil and gas facilities

- Kornienko S.G.** Informative value of ultra-high resolution
satellite images for monitoring the moisture content of the
tundra cover **82**

Strategic planning issues of oil and gas industry

- Chigarev B.N.** Analysis of the use of energy security
assessment indicators in scientific publications **96**

- Chigarev B.N.** Web of Science publications for 2019–2020
on clean energy issues: an analysis of subject areas **111**

Гипербазиты как фактор геодинамики по результатам исследований на Таймырском геофизическом полигоне

Д.Г. Кушнир

АО «Таймыргеофизика» (группа компаний АО «Башнефтегеофизика»), г. Дудинка

E-mail: d.kushnir@tmrgeo.ru

Аннотация. Данные сейсморазведки показывают повсеместное инверсионное происхождение крупнейших геоструктур Таймырского полуострова и фиксируют неоднократные изменения направления тектонических движений. Инверсия в пределах Енисей-Хатангского прогиба привела к образованию над древним депоцентром системы мегавалов, в основании которых, на уровне раздела Мохоровичича, максимумом силы тяжести маркируются широкомасштабные гипербазитовые внедрения. В условиях перманентного сжатия, сопровождавшего формирование тектоники региона, эти интрузивные процессы оцениваются как важнейший фактор, способный инициировать инверсию и в значительной степени способствовать ее развитию.

Согласно геофизическим данным, формирование прогибов севера Центральной и Западной Сибири связано с образованием под депоцентрами прогибания, на уровне раздела Мохо, эклогитов. В соответствии с геоэлектрическими аномалиями эклогиты пластичны и перекрывают мантийные гипербазиты с меньшей плотностью, что создает предпосылки для гравитационного всплывания ультраосновных образований. Это совместно с метаморфическими и метасоматическими процессами служит импульсом для роста поднятий в осевой части прогибов. Одновременно, за счет вытеснения пластичных эклогитов и коромантийной смеси из зоны внедрения в направлении периферийных частей осадочного бассейна, происходит расширение и ускорение прогибания с некомпенсированным характером накопления осадков и формированием неокомского клиноформного комплекса.

Ключевые слова: Таймыр, геодинамика, тектоника, верхняя мантия, земная кора, граница Мохоровичича, коромантийная смесь, эклогиты, Енисей-Хатангский прогиб, Гулинский массив ультрамафитов, неокомский клиноформный комплекс осадков.

Для цитирования: Кушнир Д.Г. Гипербазиты как фактор геодинамики по результатам исследований на Таймырском геофизическом полигоне // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 3–27. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art1>

Введение

На склонах Анабарской антеклизы известен ряд гипербазитовых интрузий, в том числе крупнейший в мире Гулинский массив ультраосновных и щелочных пород, приуроченный к области ее сочленения с Енисей-Хатангским прогибом. Поскольку по размерам этот массив на порядки превосходит

другие подобные плутоны, его появление традиционно соотносят с теми или иными особенностями формирования глубинной геологии Таймырского полуострова в целом, которые могли создать условия для проникновения столь значительных объемов мантийного вещества на поверхность [1–5].

В начале 2000-х гг., по результатам гравиметрической съемки масштаба 1 : 50 000 в пределах Гулинского комплекса, было зафиксировано несоответствие аномального поля силы тяжести распространению гипербазитов на

поверхности, потому что соотносимая с ними гравитационная аномалия в значительной степени смещена и объясняется, по-видимому, преимущественно другим, залегающим глубже аномалиеобразующим объектом (рис. 1).

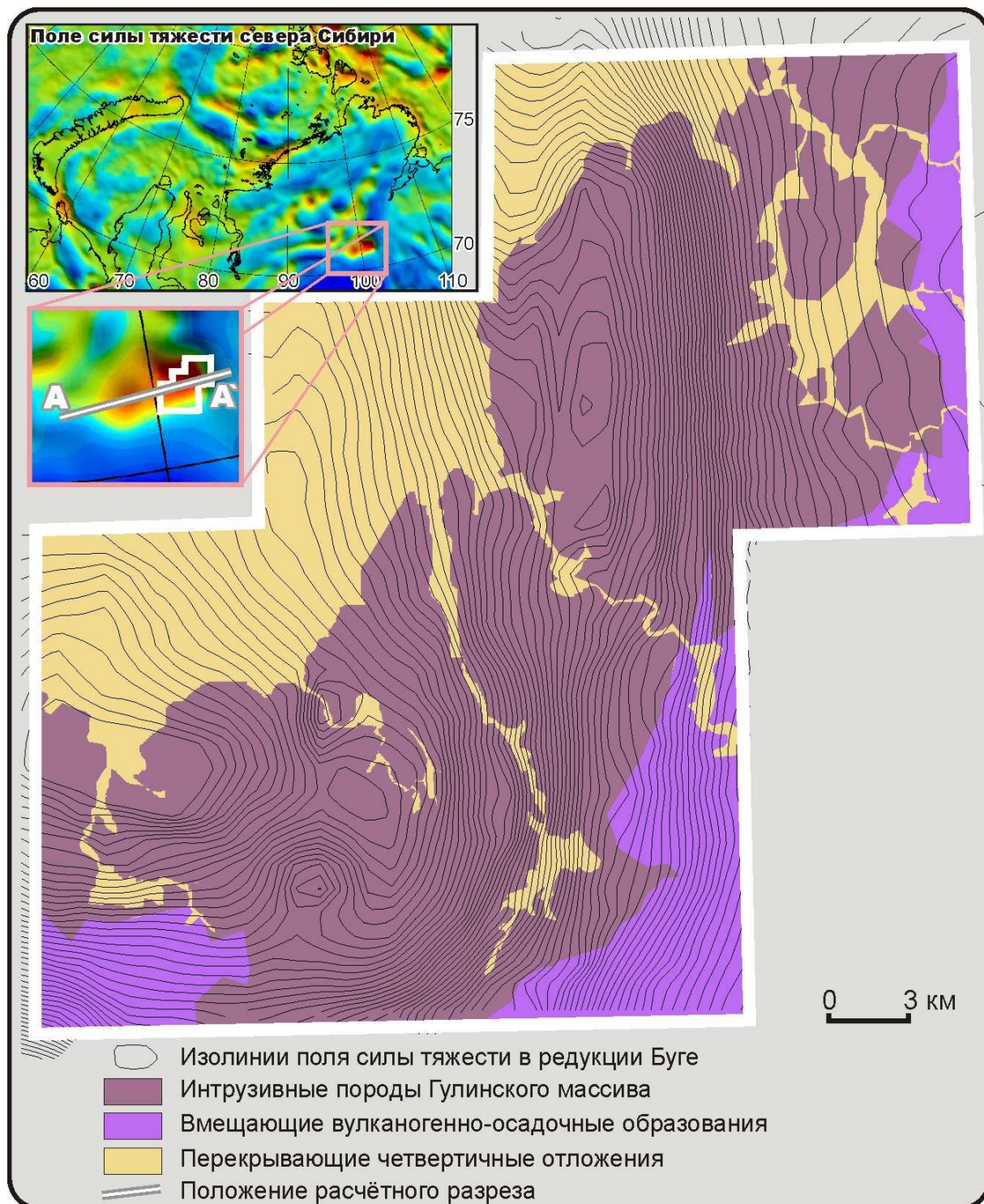


Рис. 1. Поле силы тяжести и интрузивные образования Гулинского массива ультрамафитов [6]

В итоге был сделан вывод о основной объем интрузивных масс расположен в низах земной коры (рис. 2).

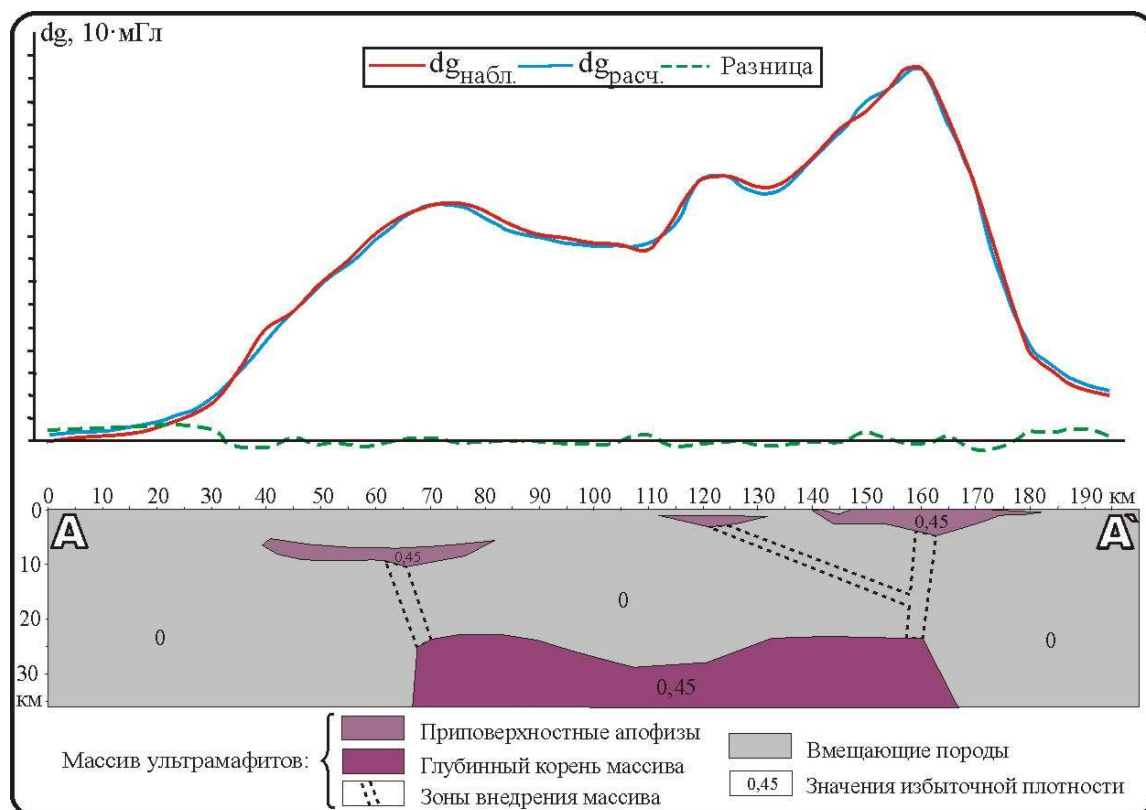


Рис. 2. Принципиальная модель строения Гулинского массива ультрамафитов по направлению, показанному на рис. 1 [6]

Выполненный в последние годы анализ гравитационных аномалий прилегающих районов Енисей-Хатангского прогиба [7] позволяет говорить об еще более широком распространении мантийных плутонов в его основании, так как предполагается единство связанного с ними аномалиеобразующего объекта и корневой части Гулинского массива (рис. 3). В свою очередь, протянувшиеся через весь полуостров положительные аномалии поля силы тяжести тоже традиционно соотносятся с ультрамафитами, поскольку их интенсивность измеряется десятками миллигал и может быть объяснена только высокоплотными внедрениями [8]. Следовательно, еще острее встает вопрос механизма подобных интрузивных процессов, потому как появление столь масштабных объектов определяется геодинамикой континента, а их становление должно подчиняться

неким общепланетарным законам.

Возможность для непосредственного детального изучения влияния гипербазитов на геодинамику появилась в последние годы по результатам нового этапа регионального изучения Таймыра, когда в пределах полуострова и прилегающих территорий был создан уникальный геофизический полигон, включающий на сегодня уже почти 50 тыс. пог. км сейсморазведки МОГТ и электро-разведки методом МТЗ. Он охватывает полосу шириной от 300 до 700 км, тянущуюся почти на 1500 км, и позволяет изучать строение земной коры до глубин 50–60 км с небывалой для континентальной литосферы плотностью – по сети маршрутов, расстояние между которыми местами не превышает 10 км [9–15].



Рис. 3. Аномальные плотности нижней коры по результатам анализа поля силы тяжести [7]

В сочетании с еще более доскональным освещением строения осадочного чехла, который хранит в себе следы всех важнейших тектонических событий, обусловивших современный структурный план региона, это позволяет надежно реконструировать историю и механизмы становления его глубинной геологии. Больше всего исторической информации заключают в себе Енисей-Хатангский прогиб и прилегающие депрессии, где в разрезе и по площади с достаточной степенью надежности прослеживаются отложения, накопившиеся с верхнего протерозоя по мел включительно (рис. 4).

Исходные данные

Осадочный чехол

Материалы сейсморазведки МОГТ выявили, что не только юрско-меловые, но и доюрские уровни геологического разреза гораздо больше подвержены пликативным

дислокациям, нежели нарушены дизъюнктивной тектоникой [14]. Так, амплитуда погружения в Енисей-Хатангском прогибе с рифея по триас составляла до 15 км, в юрско-меловое время в некоторых депоцентрах она возросла еще на 15 км, а осложняющие прогиб складки достигают по амплитуде 3–5 км, на периферии – 10–15 км. В то же время амплитуда разрывных нарушений, картируемых по данным сейсморазведки МОГТ, за редким исключением не превышает первых десятков метров (если не учитывать надвиговые дизъюнктивно-пликативные дислокации и соляную тектонику). Даже смещения по глубинным разломам, картируемые с поверхности в Норильском рудном районе, не превышают первых сотен метров, то есть на фоне пликативных дислокаций они как региональный тектонический фактор себя никак не проявляют.

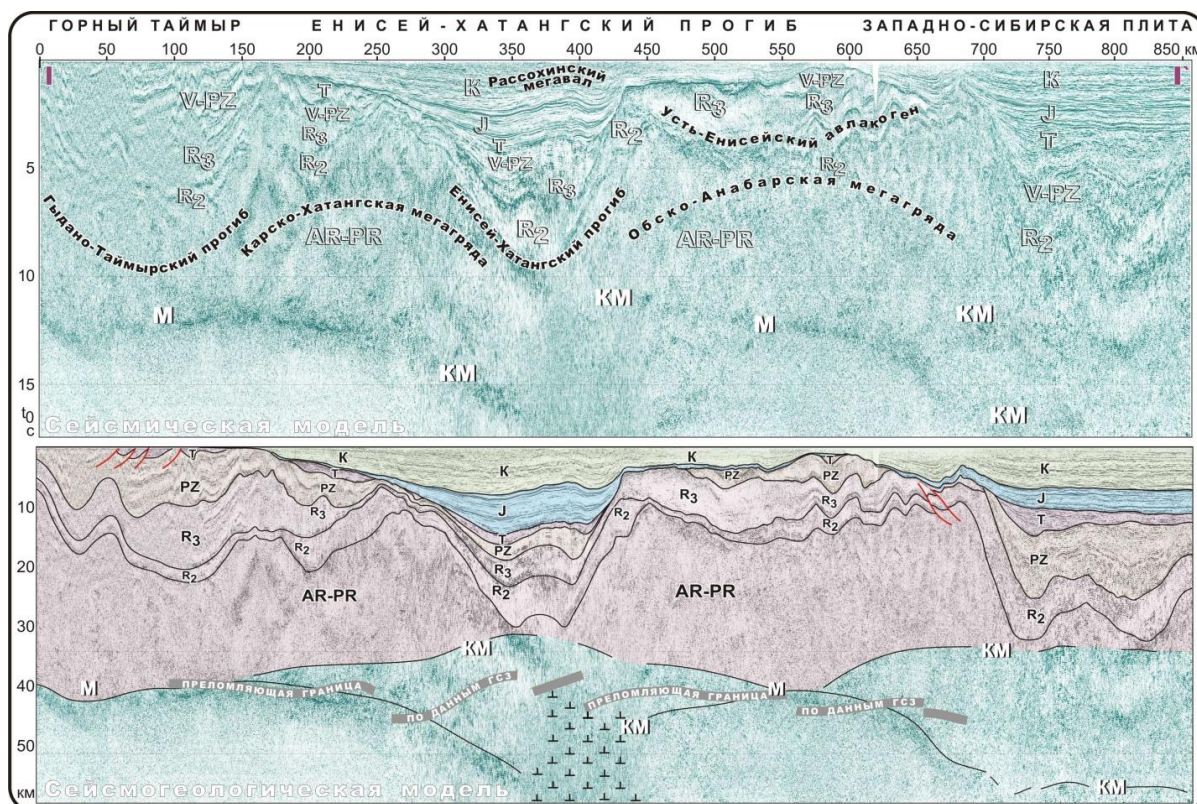


Рис. 4. Сейсмогеологическая модель Западного Таймыра (положение профиля на рис. 5)

Амплитуда разломов несопоставимо меньше амплитуды картируемых складок, поэтому приходится делать вывод, что при формировании основных геоструктур осадки погружались и воздымались преимущественно крупными блоками, без существенного нарушения сплошности.

Исключением из этого правила являются дизъюнктивно-пликативные структуры надвиговых систем, которые распространены по всему полуострову и обеспечивают перемещения аллохтона до десятков километров. Однако их подавляющая часть сосредоточена в верхних, наименее уплотненных слоях разреза, и играет осложняющую роль. Следовательно, появление складок, определяющих глубинное геологическое строение региона, – Обско-Анабарской мегагряды, Енисей-Хатангского прогиба с осложняющей его системой мегавалов, Карско-Хатангской мегагряды, Гыдано-Таймырского прогиба и

ряда других (см. рис. 4, рис. 5), – невозможно объяснить надвиганием, поскольку они, в отличие от надвигов, охватывают практически всю толщу земной коры [10, 12–16].

Примером может служить Гыдано-Таймырский прогиб, который максимально осложнен системой надвигов и соляной тектоникой [10, 17, 18]. По материалам сейсморазведки в его пределах верхние несколько километров осадков обладают заметно более сложной дислоцированностью – они нарушены многочисленными разломами и дополнительными складками амплитудой до 2–3 км, затухающими с глубиной (см. рис. 4). Но сейсмические отражения по глубоким горизонтам демонстрируют, что сам прогиб и ограничивающие с юга и севера Карско-Хатангская мегагряда и Карский свод создают перегиб амплитудой до 20 км, на фоне которого дизъюнктивно-пликативные дислокации соляной и надвиговой тектоники почти не заметны.

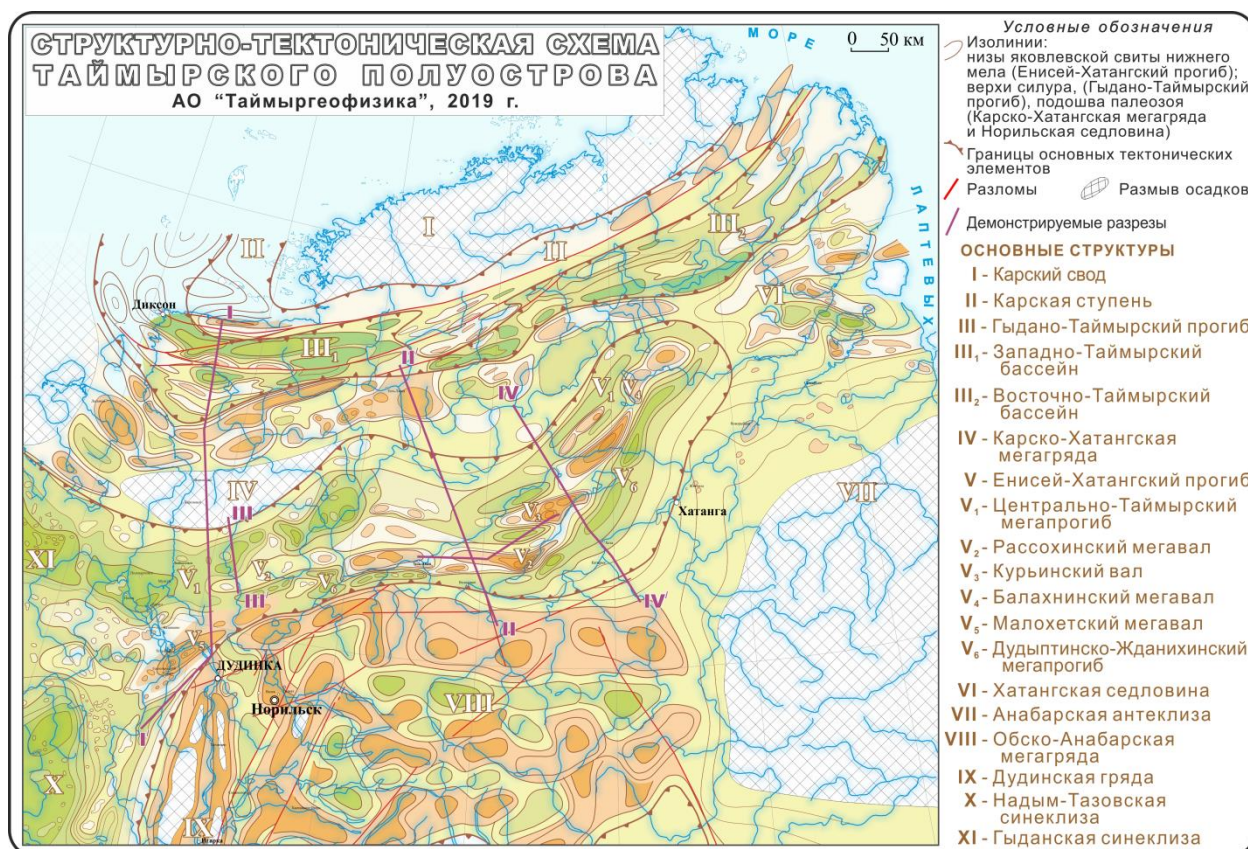


Рис. 5. Структурно-тектоническая схема Таймыра

Палеорекострукции сейсмоданных показывают, что изначально в регионе существовала система складок, включающая синклинали и антиклинали близкого порядка, и погружение в пределах Енисей-Хатангского прогиба сопровождалось воздыманием на его периферии, в пределах Карско-Хатангской и Обско-Анабарской мегагряд [12, 14]. Однако в юре и мелу ограничивающие прогиб валы были захвачены все более расширяющимся опусканием, которое и привело к возникновению мезозойских депрессий Западно-Сибирского типа. Депоцентр этого первоначального погружения наследовал свое положение всю палеозойскую эру и в начале мезозоя, но к концу юры он инверсировал. В меловой период на его месте сформировалась система мегавалов, которая в дальнейшем тоже опускалась, но уже гораздо медленнее и реже. Появились новые

депоцентры на периферии бассейна – Центральнo-Таймырский и Дудыптинско-Жданихинский мегапрогибы (см. рис. 5).

Соответственно, при переходе от юры к мелу зафиксирован период значительного повышения тектонической активности.

С ним связаны, во-первых, существенное расширение и резкое ускорение прогибания, приведшее к повсеместному образованию впадин, с глубиной моря до нескольких сот метров, которые заполняются за счет бокового сноса осадков и обуславливают накопление неокомского клиноформного комплекса.

Во-вторых, к этому же времени приурочена инверсия тектонических движений в осевой части прогиба и рост инверсионной системы мегавалов, ставший причиной размыва до 3 км юрских отложений.

В-третьих, в юрское и меловое время продолжилось развитие надвиговых систем, которые активны практически по всему полуострову, включая растущие валы, и маркируют условия регионального сжатия для тектоники Таймыра рассматриваемого периода [12–15].

Инверсия, когда с течением времени депрессии превращаются в поднятия, а поднятия захватываются опусканием, характерны для всех изученных крупнейших геоструктур Таймырского полуострова [14]. Помимо Енисей-Хатангского прогиба, который подвергся пока лишь частичной инверсии, полная смена режима погружения на режим воздымания произошла в Гыдано-Таймырском прогибе, где толщи рифея, палеозоя и триаса мощностью до 20 км сегодня слагают горы Бырранга и местами уже в значительной мере размыты. Карско-Хатангская мегагряда, разделяющая Гыдано-Таймырский и Енисей-Хатангский прогибы,

будучи источником сноса вследствие своего роста с рифея по триас, в мезозое была охвачена нисходящими движениями, сопровождающими расширение Енисей-Хатангского желоба (см. рис. 4). В своде Обско-Анабарской мегагряды, воздымавшейся большую часть палеозойской эры и вновь охваченной опусканием на рубеже юры и мела, отмечается авлакоген, заполненный рифейскими и палеозойскими осадками мощностью свыше 10 км, что свидетельствует уже о двукратной тектонической инверсии.

Глубокие горизонты земной коры

Области юрско-мелового погружения, осложняющая их система инверсионных валов и сопредельные структуры, представленные более древними осадками, в существенной степени различаются по строению глубоких горизонтов земной коры, которые по-разному проявляют себя в геофизических полях (см. рис. 4, рис. 6).

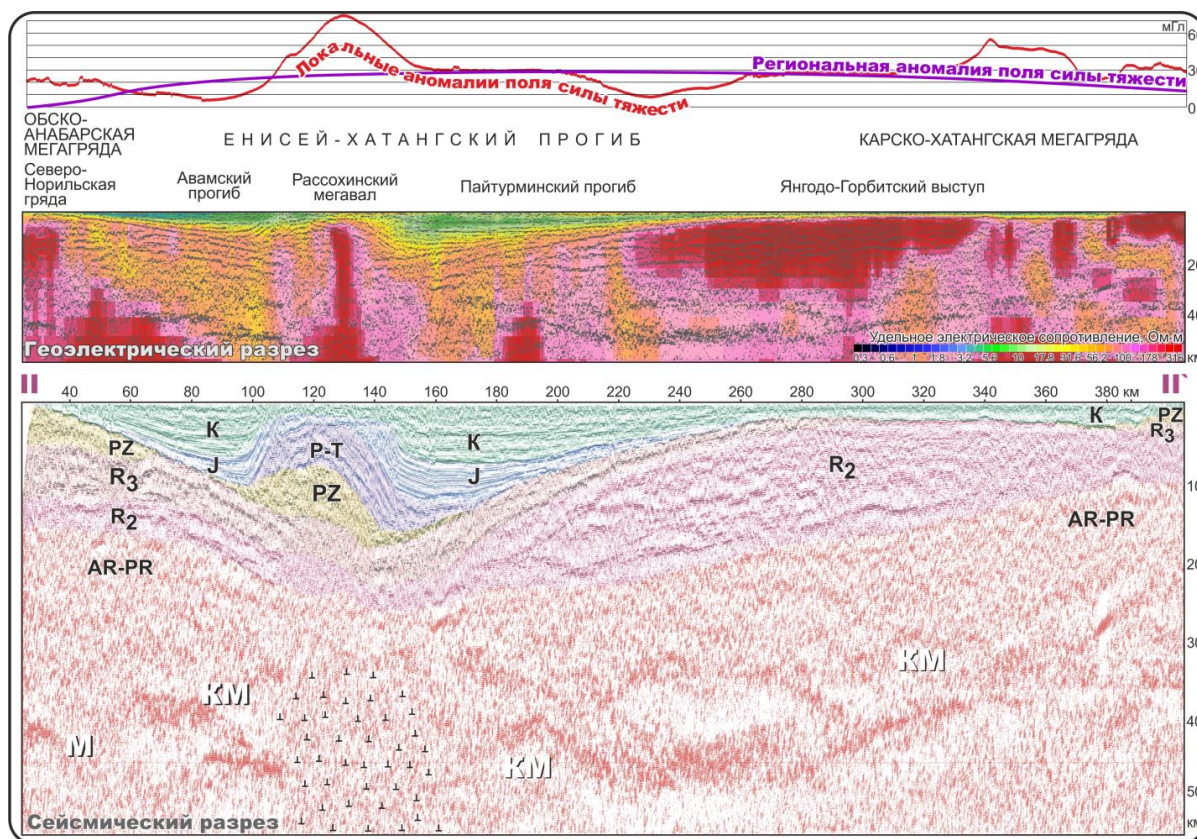


Рис. 6. Геофизическая модель строения Центрального Таймыра [14] (положение профиля на рис. 5)

Наиболее крупная аномальная зона соответствует мезозойским депрессиям. На разрезах МОГТ она проявляется раздвоением сейсмической границы М, в результате чего на глубинах 30–60 км в основании Енисей-Хатангского желоба оконтуривается своего рода линза. Внутри этой линзы оказывается значительная часть консолидированной коры, погружившейся при формировании прогиба, а также мантийное вещество, о присутствии которого свидетельствует положение преломляющей границы Мохоровичича между отражениями от кровли и подошвы линзы (см. рис. 4). Кроме того, в ней заключены переходные по своему составу образования, обладающие промежуточными значениями скорости распространения упругих колебаний (до 6.9–7.4 км/с по продольным волнам и до 4.2 км/с по поперечным [19, 20]). Учитывая

то, что эта линза частично охватывает и нижнюю кору, и верхнюю мантию, ее границы, фиксируемые по данным сейсморазведки на отраженных волнах, должны рассматриваться как кровля и подошва коромантийной смеси (КМ).

Со стороны коры эта смесь преимущественно включает измененные под влиянием мантийных флюидов базальты (прежде всего, уплотненные, согласно региональному максимуму поля силы тяжести амплитудой до 30 мГл, см. рис. 6). А если учитывать, что кровля кристаллического фундамента в наиболее погруженных депрессиях смыкается с границей КМ (рис. 7), то местами можно предполагать участие в процессах уплотнения всей консолидированной коры вплоть до осадочного чехла.

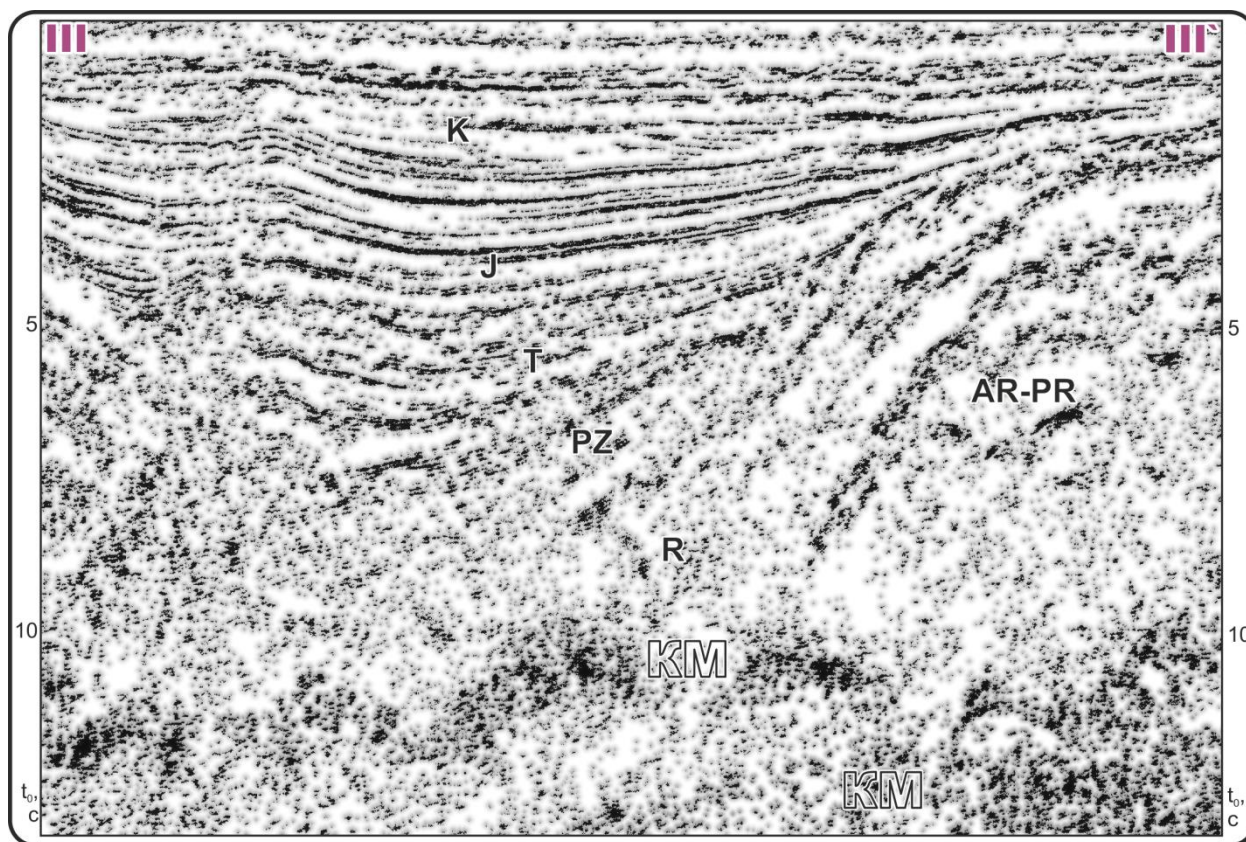


Рис. 7. Взаимоотношение сейсмических отражений от осадков Енисей-Хатангского прогиба с горизонтом КМ (разрез энергии сейсмической записи, положение профиля на рис. 5)

Принимая во внимание, что в относительно компактном слое коромантийной смеси сконцентрированы базальтовый и гранитный слои коры с участием мантийного материала, приходится предполагать там повышенное давление. Совместно с увеличенным значением геотермического градиента, область которого соответствует рассматриваемому уплотнению и юрско-

меловому прогибанию (рис. 8), следует вывод о протекающих на уровне раздела Мохо процессах эклогитизации, напрямую связанных с ужесточением термодинамических условий (рис. 9). Считается, что именно эти процессы служат исходным импульсом для начала формирования глубоких депрессий на континентах [21–25].

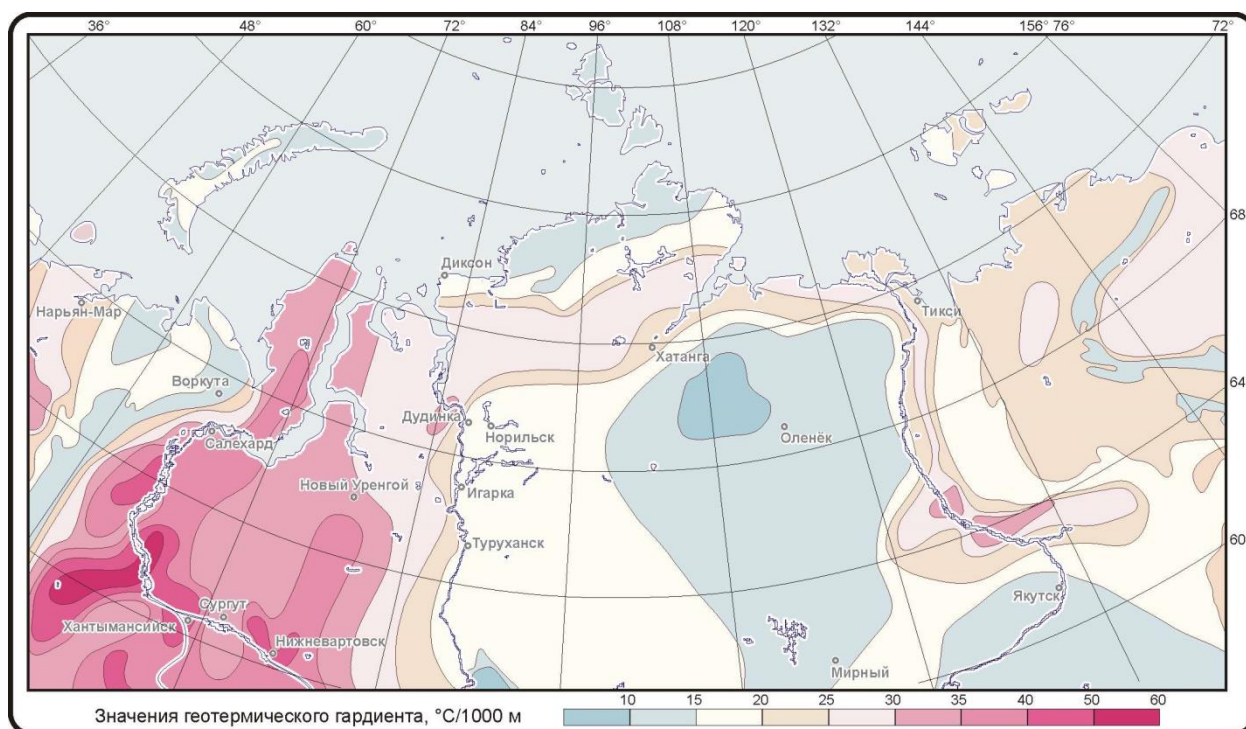


Рис. 8. Выкопировка из карты геотермического градиента земной коры территории СССР [26]

Превращение габбро в гранатовые гранулиты, а затем – в эклогит под влиянием мантийных флюидов подтверждается понижением удельного электрического сопротивления эклогитизированной коромантийной смеси (см. рис. 6), что показывает насыщенность ее флюидами мантийного происхождения [27] и вытекающую из этого повышенную пластичность.

Повышение пластичности, в свою очередь, объясняет появление на границах

размягченного флюидами тела отражающих сейсмических горизонтов, которые на уровне раздела Мохоровича сопоставляют с движением литосферных плит и возникающими при этом расслоением и неровностями в области соприкосновения коры и мантии [28]. Следовательно, и границы КМ можно считать своего рода разломами, формирующимися в результате перемещения кратонов, создающими точки дифракции и отражающие сейсмические площадки.

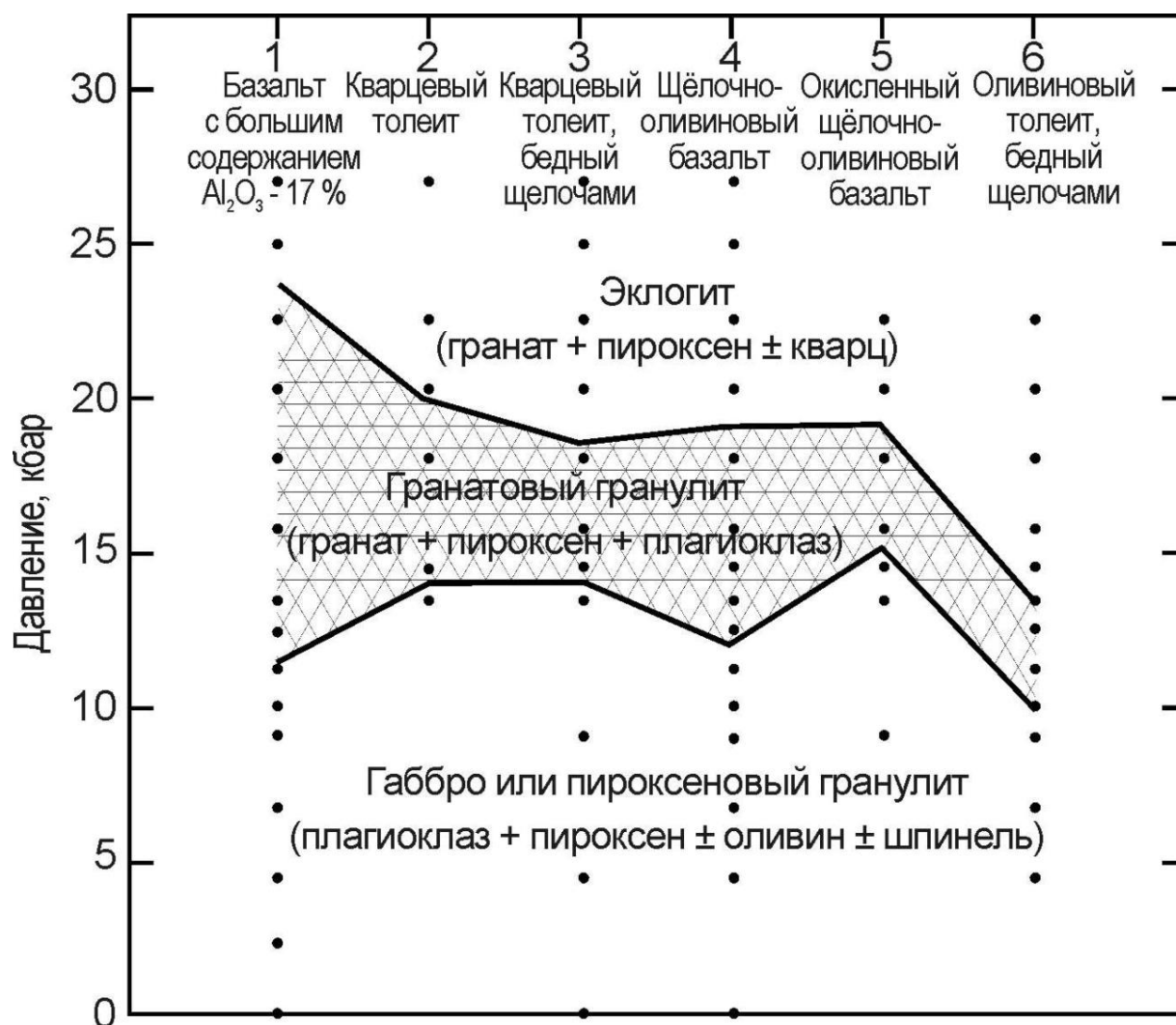


Рис. 9. Основные минеральные ансамбли некоторых базальтов как функция давления при температуре 1100 °C (точки обозначают экспериментальные данные) [29]

Они могут развиваться аналогично надвиговым дислокациям [19], но в большинстве случаев вынуждены замыкаться преимущественно на уровне раздела Мохо — ввиду приуроченности к области повышенной пластичности в основании земной коры, выше которой, изначально, залегают монолитные образования, препятствующие распространению надвигания в направлении дневной поверхности.

Дизъюнктивы такого типа на глубинах 20–30 км достаточно широко распространены не только на полуострове,

но и под акваторией арктических морей [30, 31]. Исходя из этого, можно предполагать распространение генетически близких процессов и на Таймырском шельфе.

Рассматриваемая система геофизических аномалий (в сейсмическом поле отраженных и преломленных волн, в поле силы тяжести, в геоэлектрическом и геотемпературном полях) тянется через Таймыр и Гыдан до 1500–2000 км при ширине от 300 до 700 км, расширяясь в направлении Западной Сибири.

С ней закономерно совпадает в плане область юрско-мелового прогибания, которое, судя по всему, во многом определяется становлением в низах земной коры обширного линзовидного тела с существенно более высокой по отношению к вмещающим образованиям плотностью. Погружение уплотненных литосферных блоков и опускание всей толщи связанных с ними пород происходит под действием гравитационного поля Земли и направлено на изостатическое уравнивание [13–15].

Региональные геофизические аномалии осложнены серией экстремумов более высокого порядка, среди которых выделяются те, что отвечают инверсионным валам – Малохетскому, Рассохинскому, Курьинскому и Балахнинскому. Они характеризуются максимумом удельного электрического сопротивления, охватывающим почти весь изученный интервал геологического разреза, и интенсивным увеличением поля силы тяжести, а также прекращением прослеживания отражающих сейсмических площадок на уровне раздела Мохоровичича и в нижней коре (см. рис. 6). Эти аномалии при ширине до 200 км тянутся на сотни километров и в юго-восточной части региона объединяются с аналогичными аномалиями Гулинского массива ультрамафитов (см. рис. 3), что говорит об их возможной генетической близости.

Гулинский массив ультрамафитов

С учетом амплитудных максимумов и высоких градиентов поля силы тяжести до начала 2000-х гг. предполагалось значительное распространение интрузивных ультраосновных горных пород в разрезе. Чтобы выбрать соотносимую с ними гравитационную аномалию, массив должен обладать по простираению размерами порядка 200 км с мощностью около 10 км и

представлять собою гигантское пластообразное тело, выходящее на поверхность в районе р. Гулэ и полого погружающееся в северо-западном направлении.

Вместе с тем, детальный анализ поля силы тяжести совместно с геологической ситуацией в районе Гулинского комплекса позволил сделать вывод, что выходы гипербазитов на поверхность прослеживаются и за границами соотносимого с ними гравитационного максимума (см. рис. 1). На восточном фланге интрузии область распространения гипербазитовых внедрений без изменения состава пересекает зону повышенного градиента гравитационного поля, по которой традиционно проводились ее границы.

Подобная ситуация, по-видимому, сложилась в результате относительно малой мощности выходящих на поверхность интрузивных образований, в то время как основной максимум силы тяжести связан с залегающим гораздо глубже более крупным объектом. Поскольку, согласно данным сейсморазведки, подстилают Гулинский массив хорошо сохранившиеся осадочные толщи, и внедрение значительного объема интрузивных масс можно предположить только под ними (рис. 10), то искать обуславливающее гравитационную аномалию тело приходится уже на уровне раздела Мохоровичича. Следовательно, подтверждается двухуровневое строение плутона (см. рис. 2), когда большая часть ультрамафитов находится в низах земной коры. Помимо гравитационных аномалий и отражающих сейсмических площадок, она фиксируется также преломляющими границами в кровле и подошве корневой части массива, которые отмечаются по данным глубинных сейсмических зондирований на профиле Воркута-Тикси в виде раздвоения границы М (рис. 11).

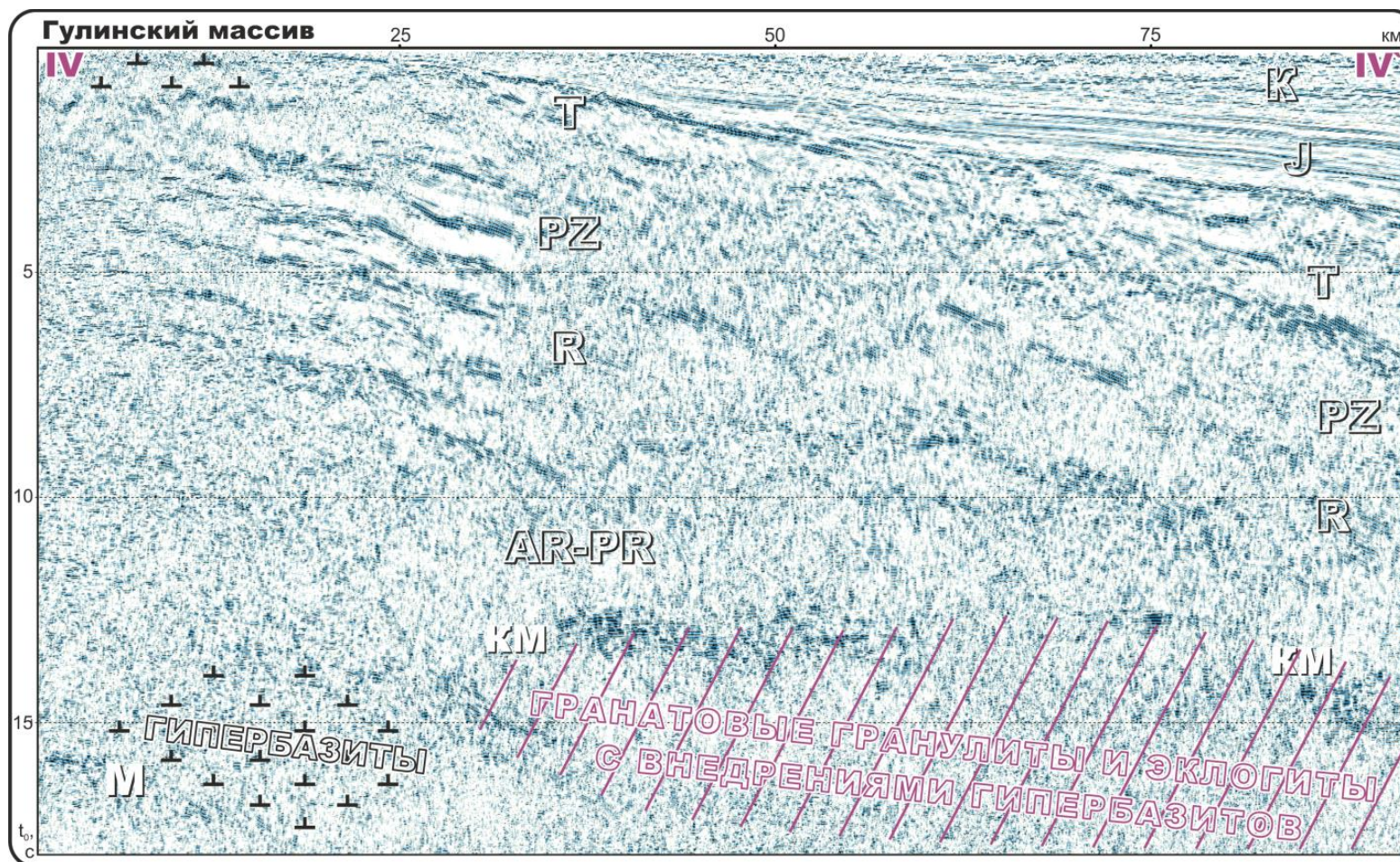


Рис. 10. Наиболее крупные интрузивные и метаморфические тела в районе внедрения Гулинского массива ультрамафитов по данным сейсморазведки МОГТ (положение профиля на рис. 5)

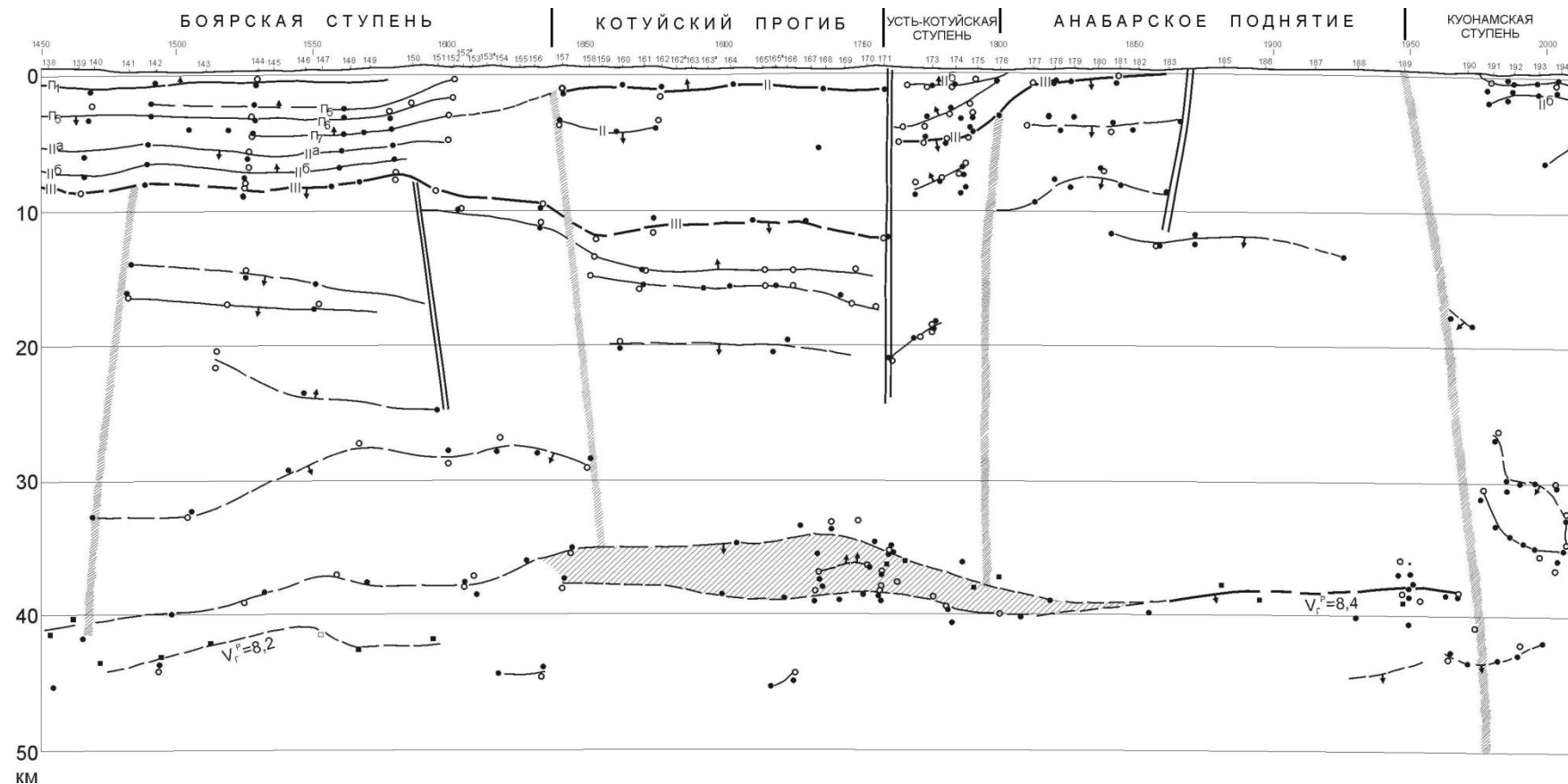


Рис. 11. Область с переходными свойствами на границе коры и мантии (показана штриховкой) по данным глубинных сейсмических зондирований (Чернышев Н.М., Егоркин А.В., 1978)

Объединение плотностных аномалий под Гулинским интрузивом с аналогичными неоднородностями в основании Енисей-Хатангского прогиба (см. рис. 3, 10) может быть признаком существования на уровне раздела Мохоровичича единого колоссального массива гранатовых гранулитов и эклогитов с многочисленными внедрениями мантийных гипербазитов, апофизом которых являются выходящие на поверхность ультрамафитовые тела.

Обсуждение

Наиболее очевидный и всеми признаваемый геодинамический фактор, контролирующий тектонику рассматриваемого региона, – коллизионные процессы на стыке Сибирской платформы и Карского кратона. Создаваемые при этом субмеридионально ориентированные напряжения определяют преимущественно субширотное простирание валов и прогибов первого порядка уже с венда. О влиянии горизонтальных напряжений красноречиво свидетельствуют картируемые домезозойские складки, составляющие систему, которая включает антиклинали и синклинали близкого порядка (см. рис. 5), характерные для обстановки сжатия. Показателем такого сжатия служит и Таймырская надвиговая система, дизъюнктивно-пликативные структуры которой максимально широко развиты на побережье морей Карского и Лаптевых, протягиваясь вглубь континента, на расстояние до 500 км [12, 14].

Однако, несмотря на становление геологии Таймыра в условиях коллизии и подчиненность ее субмеридиональным напряжениям с надвиговыми системами соответствующего простирания, самые значимые тектонические элементы региона не связаны напрямую с горизонтальным сжатием и являются инверсионными. В их

пределах воздымание и опускание сменяли друг друга, причем в некоторых случаях можно уверенно говорить, что это происходило неоднократно.

На уровне раздела Мохоровичича картируются контрастные аномалии, которые маркируют изменения плотности и электропроводности, совпадающие в плане с крупнейшими геологическими структурами севера Центральной и Западной Сибири (см. рис. 6). Взаимосвязь появления мегавалов и мегапрогибов с уплотнением или разуплотнением их основания показывает, с одной стороны, протекающий там под действием астеносферных флюидов метаморфизм, с другой – определяющую роль изостатического выравнивания при формировании этих тектонических элементов [14].

Исходя из этого, возникновение мезозойских депрессий севера Центральной и Западной Сибири слабо связано с континентальным рифтогенезом. Более того, с учетом совершенного доминирования пликативных дислокаций и высокой степени сохранности всех уровней осадочного чехла с рифея по кайнозой, рифтогенная природа прогибания в этом случае полностью исключается [12, 14].

В пределах Енисей-Хатангского прогиба рифтовой природе тектоногенеза противоречит также то, что все наиболее значимые глубинные геологические процессы (изменение режима прогибания в его осевой части на режим воздымания, рост инверсионных валов и развитие новых депоцентов) протекали при сохранении сжимающих напряжений. Перманентные условия сжатия, сопровождавшие мезозойское прогибание, доказываются продолжением надвигания в свде растущих валов, которое зафиксировано расходящимися сейсмофациями нижнего мела на фронте аллохтона [12, 14].

Таким образом, впервые прямыми геофизическими наблюдениями показано, что становление тектоники не исчерпывается простыми горизонтальными перемещениями кратонов и связанными с ними деформациями. Согласно полученным данным, глубинное геологическое строение региона, помимо коллизий, объясняется вертикальными напряжениями, связанными с уплотнением или разуплотнением земной коры под воздействием поступающего из мантии вещества и изостатическим выравниванием, компенсирующим эти изменения плотности [14].

Вертикальные тектонические движения не являются однонаправленными и периодически меняют свой знак, о чем говорит инверсионный характер крупнейших структур осадочного чехла Таймыра. В ходе геологического развития на месте прогибов, как правило, образуются валы, а поднятия и гряды в той или иной степени захватываются опусканием. Такие изменения, согласно полученным данным, определяются структурой нижней коры и верхней мантии, мощностью и степенью преобразованности коромантийной смеси, внедрениями в нее гипербазитов.

Самая молодая и наиболее доступная сегодня для анализа инверсия – рост валов в осевой части Енисей-Хатангского прогиба. Согласно классическим геотектоническим представлениям [32, 33] подобную инверсию осевой части депрессий можно объяснить только влиянием дополнительных вертикально ориентированных напряжений, какие создаются, обычно, интрузивными процессами.

В границах прогиба уплотнение нижней коры в значительной мере влияет на погружение уже в триасе, а начиная с юрского времени, практически полностью его обуславливает и приводит к появлению

крупных осадочных бассейнов. С расширением и ускорением прогибания совпадают по времени инверсия осевой части Енисей-Хатангского прогиба и относительно быстрый рост пересекающей его системы мегавалов. Следствием структурной перестройки стали одновременный размыв более трех километров юрских осадков в свode растущих инверсионных поднятий, а за их пределами – накопление полуторакилометровых клиноформных толщ во вновь образованных депоцентрах [13–15].

На момент инверсии депоцентры домелового опускания характеризуются максимальной продолжительностью и стадией метаморфизма на уровне коромантийной смеси. На этих участках эклогитизация ближе всего к завершению, а образующиеся гранулиты и эклогиты существенно превосходят по плотности не только все окружающие образования коры, но и подстилающие гипербазиты верхней мантии, у которых в такой ситуации возникают предпосылки для гравитационного всплывания в вышележащие уровни. Тем более что уплотненная эклогитизированная коромантийная смесь обладает еще и увеличенной пластичностью вследствие флюидонасыщения, которое создает условия для вытеснения метаморфических образований вдоль измененного слоя.

В этой связи при внедрении мантийных гипербазитов можно предположить латеральное перетекание значительных объемов эклогитов в направлении периферийных частей осадочного бассейна, проявлением которого становятся новые депоцентры. Такие контрастные локальные прогибы, непосредственно примыкающие к начинающему свой рост валу, отмечаются при палеовыравнивании по кровле юрских отложений (рис. 12, реконструкция 1).

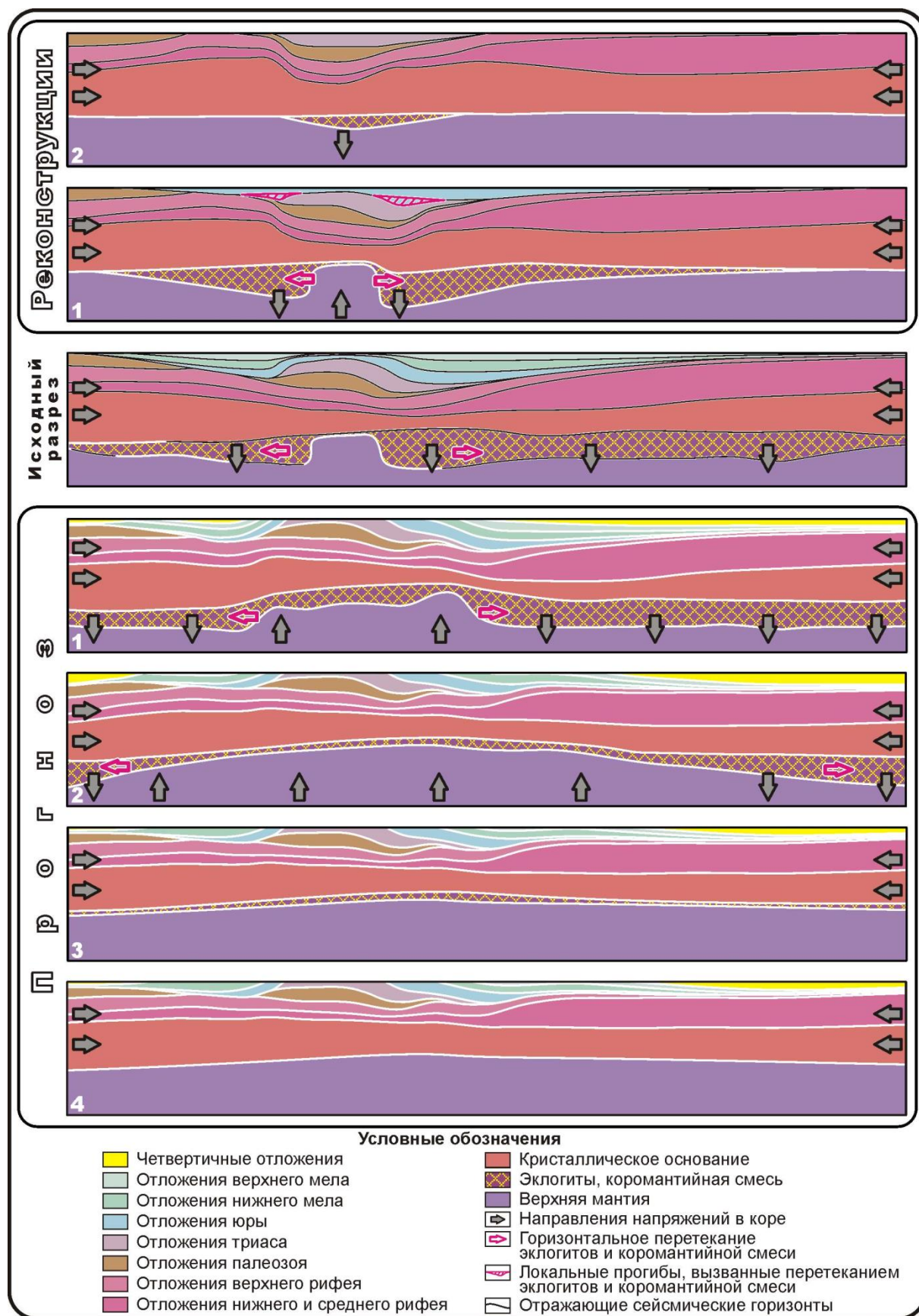


Рис. 12. Палеорекострукции по данным сейсморазведки и прогноз развития Енисей-Хатангского осадочного бассейна (на основе разреза, приведенного на рис. 6)

Очевидно, что, как и другие процессы мезозойского прогибания, эти локальные депоцентры тоже связаны с уплотнением на уровне границы Мохоровичича. В меловой период они постепенно отдаляются от инверсионных валов, что фиксируется максимумами мощности клиноформных тел*. Судя по всему, подобное волнообразное смещение депоцентров свидетельствует о соответствующем перемещении разогретого и размягченного мантийными флюидами, максимально измененного процессами эклогитизации вещества коромантийной смеси, импульсом для которого послужили внедрения гипербазитов, вызвавшие инверсию прогибания и рост поднятий в осевой части древней депрессии.

На следующем этапе, после ускоренного погружения и накопления толщ некомпенсированного осадконакопления, коромантийная смесь, испытывавшая «эклогитовую волну» и связанные с ней дополнительные метаморфические изменения, обуславливает продолжение опускания, которое равномерно охватывает расширившийся район ее распространения и компенсируется осадками.

Расширение области, охваченной прогибанием, сохраняется вплоть до кайнозоя. Следовательно, можно предполагать продолжение растекания пластичных эклогитов и гранулитов, сопровождающееся увеличением мощности метаморфического слоя на уровне раздела Мохо (см. рис. 12, исходный разрез).

В свою очередь, увеличение объема метаморфитов и ускорение метаморфизма в

низах коры опять же должно рано или поздно привести к новым интрузиям мантийного вещества и связанным с ними инверсиям, к новому расширению и валов, и депрессий (см. рис. 12, прогноз 1). Вероятно, аналогичные процессы будут продолжаться до тех пор, пока пластичные эклогитизированные образования в основной своей массе не будут вытеснены полностью (либо не отделятся от коры и в той или иной форме не станут частью мантии). При этом существенный дефицит массы коры, ввиду полного или частичного выпадения из разреза кристаллических образований, которые переработаны в области метаморфизма (см. рис. 4, 6, 7), должен будет привести к восстановлению изостатического равновесия (см. рис. 12, прогноз 2). Эта компенсация обусловит наиболее значимые воздымания и размыв осадков, которые в той или иной степени охватят всю площадь прогибания и будут продолжаться, пока уплотнение коры за счет интрузивных и метаморфических процессов не обусловит выравнивание средневзвешенной плотности депрессий с плотностью окружающих геоструктур (см. рис. 12, прогнозы 3 и 4).

Рассмотренный прогноз в отличие от палеореконокструкций, следует считать сугубо ориентировочным, демонстрирующим лишь принципиальные моменты возможного развития тектоники региона. В данном случае для упрощения приходится пренебрегать влиянием внедрения огромных объемов гипербазитов на вещество коры, которые закономерно меняют ее свойства. Воздействие интрузий привело к стиранию всех регулярных сейсмических отражений на уровне раздела Мохо (см. рис. 4, 6) и интенсивному метасоматозу, вызванному высвобождающимися при их остывании термальными растворами.

* См. дополнительный видео-материал к статье – «Динамика формирования неокомского клиноформного комплекса Западной Сибири (смещение депоцентра прогибания в неокоме)» – http://oilgasjournal.ru/issue_29/neocomium.html

Метасоматоз охватил почти весь вышележащий геологический разрез, где заметно выросли и удельное электрическое сопротивление, и плотность, что соответствующим образом отразилось на геоэлектрических разрезах МТЗ и в поле силы тяжести (см. рис. 6). Используемая модель не учитывает также движение прилегающих геоблоков, которые при своем развитии испытали такие же тектонические инверсии (см. рис. 4) и сегодня продолжают расти (горы Бырранга, плато Путорана) в связи с освобождением от эклогитовой составляющей разреза и начавшейся компенсацией результирующего дефицита массы [25].

Если учитывать взаимодействие соседних блоков земной коры, можно предположить также, что какая-то часть пластичного эклогитового слоя попала под Енисей-Хатангский прогиб вследствие горизонтального перетекания со стороны окружающих структур. Подобно тому, как мезо-кайнозойское прогибание, расширяясь, взаимодействует с прилегающими мегагрядами и постепенно втягивает их в новое опускание (см. рис. 4).

Итак, повсеместное погружение в пределах депрессий севера Центральной и Западной Сибири продолжалось до тех пор, пока уплотнение коромантийной смеси под первоначальными депоцентрами не превысило плотность подстилающих перидотитов. Оказавшись перекрыты более плотными и в то же время пластичными толщами, мантийные образования начали внедряться в метаморфические массивы нижней коры. В результате этих интрузий очень быстро (по геологическим меркам) выросли мегавалы, пересекающие сегодня весь Енисей-Хатангский прогиб и маркирующие древний депоцентр. Одновременно расширение и ускорение

прогибания (вследствие выжимания уплотненного вещества в периферийные части бассейна) приводит к волнообразному появлению там новых депоцентров, постепенно удаляющихся от области инверсии (см. рис. 13). В результате аномально высокой скорости опускания они не успевают компенсироваться осадочным материалом, который попадает туда уже только за счет бокового сноса и формирует клиноформный комплекс неокома.

Дополнительное тектоническое воздействие горизонтального сжатия, обусловленного коллизией Карской плиты и Сибирского кратона, интенсифицирует внедрение и обеспечивает выжимание гипербазитов вверх по разрезу. В исключительных ситуациях щелочным ультраосновным породам даже удастся достигать поверхности, как это произошло в случае ультрамафитовых массивов на склоне Анабарской антеклизы.

Столь масштабные интрузии, приводящие к инверсии осевой части мегапрогиба и росту мегавалов протяженностью порядка тысячи километров, можно было бы считать уникальными, если бы не широкая известность подобных структур в аналогичных осадочных бассейнах [32]. Для большинства крупных депрессий инверсия является характерным этапом развития, о чем свидетельствует, в частности, история развития всех изученных на Таймыре древних прогибов. Поэтому существует вероятность, что гравитационное всплывание гипербазитов в нижние уровни земной коры является важным геодинамическим фактором и одной из основных причин появления первых поднятий в центре континентальных впадин при начальной стадии смены направлений тектоногенеза, на старте воздымания.

Заключение

Таймырский геофизический полигон предоставляет уникальную возможность изучения строения глубоких горизонтов земной коры и закономерностей, определяющих ее формирование, непосредственно на фактическом материале, без опоры на существовавшие ранее концепции и прогнозы, часть из которых подтверждается новыми данными, другие опровергаются. Благодаря этому открывается возможность для перехода на новый уровень понимания природы деформации континентальной литосферы.

Впервые прямыми геофизическими наблюдениями фиксируются геодинамические механизмы, которые явно не исчерпываются простыми горизонтальными перемещениями кратонов и обусловленными этим движением деформациями. В соответствии с полученными данными глубинное геологическое строение Таймыра, помимо коллизий, объясняется вертикальными напряжениями. На границе коры и мантии отмечаются контрастные аномалии, которые свидетельствуют об обширных изменениях плотности и электропроводности, совпадающих в плане с самыми значимыми тектоническими элементами севера Центральной и Западной Сибири. С одной стороны, уплотненная кора под депрессиями и облегченная под горными районами демонстрируют определяющую роль изостатического выравнивания при становлении этих структур. С другой стороны, флюидонасыщенность, маркируемая понижением удельного электрического сопротивления, доказывает тесную взаимосвязь аномального уплотнения с метаморфизмом. Таким образом,

подтверждаются представления об эклогитизации как основном факторе образования сверхглубоких осадочных бассейнов и, наоборот, освобождении от эклогитовой составляющей под депрессиями как о принципиальном условии для наиболее широкой инверсии и горообразования [21–25].

Подтверждается и предполагавшаяся ранее взаимосвязь региональных прогибов с дизъюнктивными надвигового типа на уровне раздела Мохоровичича [19, 30, 31]. На Таймыре за счет высокой детальности и глубинности геофизических наблюдений последних лет впервые удалось надежно зафиксировать, что эти разломы, отходя от поверхности М, замыкаются, зачастую, на нее же, формируя своеобразный дуплекс по границам высокоплотной и пластичной коромантийной смеси.

Также в новых данных находит косвенное доказательство предполагавшееся ранее перераспределение вещества земной коры в форме горизонтального течения [34]. Палеорекострукции данных сейсморазведки показывают, что рост инверсионных мегавалов сопровождался одновременным образованием депоцентов в самой непосредственной близости от растущего свода, которые в дальнейшем постепенно смещаются, удаляясь от зоны инверсии. Следовательно, погружение, вероятно, увязывается с ростом поднятий и интрузивными явлениями в их основании, из-за которых уплотненное пластичное вещество насыщенного эклогитами коромантийного композита вытесняется из районов внедрения в направлении периферии, где плотность в результате еще больше возрастает, интенсифицируя прогибание.

Вместе с тем, первые же полученные фактические геофизические данные повышенной детальности полностью исключают рифтогенную природу Енисей-Хатангского прогиба и связанных с ним депрессий Западной Сибири. Аналогичный вывод сделан и для целого ряда древних авлакогенов, изученных на Таймыре, поскольку повсеместно зафиксирована высокая степень сохранности всех уровней осадочного чехла с рифея по кайнозой и очевидно подчиненный характер дизъюнктивной тектоники, амплитуды которой никак не могут обеспечить становление наблюдаемых впадин. По-видимому, процессы рифтогенеза на континентах распространены в гораздо меньшей степени, чем предполагалось до сих пор, и большинство осадочных бассейнов на материках обязаны своим появлением метаморфизму, протекающему в низах земной коры, и

переходу габбро в эклогит под влиянием мантийных флюидов.

Инверсионное происхождение крупнейших геоструктур Таймырского полуострова доказывает, что вертикальные перемещения континентальных блоков не являются однонаправленными и периодически меняют свой знак. В ходе геологического развития на месте прогибов, как правило, образуются валы, а поднятия и гряды в той или иной степени захватываются опусканием, что определяется колебанием термплотностных характеристик литосферы, а также гравитационным всплыванием мантийных гипербазитов и горизонтальным течением насыщенного флюидами уплотненного эклогитизированного вещества. Подобные вертикальные колебательные тектонические движения, судя по всему, широко распространены на континентах, то есть их дальнейшее изучение позволит глубже понять глобальную геодинамику в целом.

Литература

1. *Васильев Ю.Р.* Петрология ультрабазитов Гулинского плутона (север Сибирской платформы) // Проблемы петрологии ультраосновных и основных пород. М.: Наука. 1972. С. 7–25.
2. Гулинская интрузия ультраосновных-щелочных пород / Под ред. Н.А. Елисеева и Ю.М. Шейнманна. М.: Госгортехиздат, 1961. 274 с. (Труды НИИГА. Т. 122).
3. *Егоров Л.С.* Форма, структура и эволюция Гулинского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 11. С. 41–56.
4. *Жабин А.Г.* О строении и последовательности формирования Гулинского комплекса дунитов, ультраосновных и ультраосновных-щелочных лав, щелочных пород и карбонатитов // Петрология и геохимические особенности комплекса ультрабазитов, щелочных пород и карбонатитов. М.: Наука. 1965. С. 159–192.
5. *Шейнманн Ю.М.* О новой петрографической провинции на севере Сибирской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1947. № 1. С. 123–134.
6. *Кушнир Д.Г.* Новые представления о глубинном строении Гулинского массива ультрамафитов по геофизическим данным // Геофизика. 2006. № 1. С. 59–61.
7. *Афанасенков А.П., Лыгин И.В., Обухов А.Н., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М.* Объемная реконструкция тектонических элементов Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации // Геофизика. 2017. № 2. С. 60–70.
8. *Яскевич В.И., Яковлев Ю.К., Четвергов А.П., Ключко В.П., Степанов В.И.* Результаты и проблемы изучения тектоники западной части Сибирской платформы и Енисей-Хатангского

прогиба по геолого-геофизическим данным // Тектоника Сибири. Тектоника и нефтегазоносность Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск. 1980. Т. 10. С. 79–84.

9. *Казаис В.И., Мельник А.И., Кушнир Д.Г.* Эффективность нового этапа региональной сейсморазведки на Таймыре // Перспективы развития нефтегазодобывающего комплекса Красноярского края: Материалы конф. Красноярск. 2007. С. 70–75.

10. *Кушнир Д.Г.* Нефтегазоносность Таймырского побережья по результатам нового этапа региональных работ // Нефть и газ Арктического шельфа: Материалы конф. Мурманск. 2008. С. 96–99.

11. *Кушнир Д.Г.* Эффективность региональных сейсморазведочных работ на Таймыре // Природные ресурсы Красноярского края. 2013. № 18. С. 38–41.

12. *Кушнир Д.Г.* Глубинное геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Приенисейской полосы Таймыра и Гыдана // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2016. Т. 11, № 1. С. 8. https://doi.org/10.17353/2070-5379/6_2016

13. *Кушнир Д.Г.* Глобальные геодинамические процессы в свете уникальных геофизических данных, полученных в последние годы на Таймыре // Геосочи-2017. Нефтегазовая геология и геофизика: Материалы конф. 2017. С. 59–62.

14. *Кушнир Д.Г.* Геодинамика полуострова Таймыр по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 1. С. 81–92. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0338>

15. *Кушнир Д.Г., Жужель А.С.* Глобальная геодинамика по данным Таймырского геофизического полигона // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: Материалы XXI науч.-практ. Щукинской конф. с междунар. участием. М.: ИФЗ РАН, 2018. С. 209–213.

16. *Кушнир Д.Г.* Палеозойские мегавалы на севере Центральной и Западной Сибири // Геотектоника. 2006. № 5. С. 85–91.

17. *Верниковский В.А.* Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области. Новосибирск. Изд-во Сиб. отд. РАН, НИЦ ОИГТМ. 1996. 202 с.

18. *Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Матушкин Н.Ю., Метёлкин Д.В., Советов Ю.К.* Геодинамическая эволюция складчатого обрамления и западная граница сибирского кратона в неопротерозое: геолого-структурные, седиментологические, геохронологические и палеомагнитные данные // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 4. С. 502–519.

19. *Костюченко С.Л.* Структура коры и глубинные механизмы формирования Приарктических континентальных осадочных бассейнов Сибири // Региональная геология и металлогения. 2000. № 10. С. 125–135.

20. *Сурков В.С., Смирнов Л.В., Жеро О.Г.* Раннемезозойский рифтогенез и его влияние на структуру литосферы Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 1987. № 9. С. 3–11.

21. *Артюшков Е.В.* Геодинамика. М.: Наука. 1979. 328 с.

22. *Артюшков Е.В.* Механизм образования сверхглубоких осадочных бассейнов. Растяжение литосферы или эклогитизация? // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 12. С. 1675–1686.

23. *Артюшков Е.В., Чехович П.А.* Изменения уровня моря и быстрые движения земной коры в платформенных областях в позднем палеозое // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 10. С. 1567–1592.

24. *Артюшков Е.В.* Новейшие поднятия земной коры как следствие инфильтрации в литосферу мантийных флюидов // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 6. С. 738–760.
25. *Артюшков Е.В., Кориковский С.П., Массон Х.-Й., Чехович П.А.* Новейшие поднятия коры на докембрийских кратонах. Основные закономерности и возможные механизмы // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 11. С. 1737–1764. <https://doi.org/10.15372/GiG20181101>
26. Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов. Масштаб 1 : 10 000 000 / Под ред. А.А. Смыслова. СПб.: ВСЕГЕИ, Мингео СССР. 1978.
27. *Jones A.G.* Electrical properties of the lower continental crust // Continental lower crust / Ed. by D.M. Fountain, R.J. Arculus, R.W. Kay. Amsterdam: Elsevier, 1992. P. 81–143.
28. *Павленкова Н.И.* Развитие представлений о сейсмических моделях земной коры // Геофизика, 1996. № 4. С. 11–19.
29. *Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику. М.: ООО «Наука и образование». 2013. 414 с.
30. *Павленкова Н.И., Кашибин С.Н., Гонтовая Л.И., Павленкова Г.А.* Глубинное строение и геодинамика Охотоморского региона // Региональная геология и металлогения. 2018. № 76. С. 70–82.
31. *Павленкова Н.И., Кашибин С.Н., Гонтовая Л.И.* Глубинные нарушения и сейсмичность охотского моря // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: Материалы XXI науч.-практ. Щукинской конф. с междунар. участием. М.: ИФЗ РАН, 2018. С. 280–284.
32. *Белоусов В.В.* Основы геотектоники. 2-е изд. М.: Недра. 1989. 382 с.
33. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.
34. *Павленкова Н.И., Кашибин С.Н., Павленкова Г.А.* Земная кора глубоких платформенных впадин Северной Евразии и природа их формирования // Физика Земли. 2016. № 5. С. 150–164. <https://doi.org/10.7868/S0002333716050124>

Hyperbasites as a factor of geodynamics: the results of the surveys at the Taimyr geophysical site

D.G. Kushnir

Taimyrgeofizika JSC (Bashneftegeofizika Group of Companies JSC), Dudinka

E-mail: d.kushnir@tmrgeo.ru

Abstract. Seismic data indicate the widespread inversion origin of the largest geological structures of the Taimyr Peninsula and record repeated changes of the direction of tectonic movements. The inversion the Yenisei-Khatanga trough led to the formation of a system of megaarchs over the ancient depocenter containing massive hyperbasite intrusions at the Moho level, which are marked by the gravity maximum. These intrusive processes are an important factor that can initiate inversion and contribute significantly to its development under permanent compressional tectonic regime in the region.

According to the geophysical data, the development of troughs in the north of Central and Western Siberia is associated with the formation of eclogites under the depocenters, at the Moho level. Consistent with the electrical resistivity anomalies, eclogites are plastic and overlap mantle hyperbasites of lower density that leads to gravitational buoying up of ultramafic formations. This, along with metamorphic and metasomatic processes, acts as an impulse for the uplift in the axial parts of the troughs. Simultaneously, expansion and acceleration of sagging, due to the displacement of plastic eclogites and crystal-mantle mixture from the penetration zone towards the peripheral parts of the sedimentary basin, result in the uncompensated sediment accumulation and the formation of the Neocomian clinoform complex.

Keywords: Taimyr, geodynamics, tectonics, upper mantle, crust, Mohorovichich border, coromancy mixture, eclogites, Yenisei-Khatanga trough, Gulinsky ultramafic massif, Neocomian clinoform sedimentary complex.

Citation: *Kushnir D.G.* Hyperbasites as a factor of geodynamics: the results of the surveys at the Taimyr geophysical site // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 3–27. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art1> (In Russ.).

References

1. *Vasiliev Yu.R.* Petrology of ultrabasites of the Gulinsky pluton (the north of the Siberian platform) // Problems of petrology of ultrabasic and basic rocks. Moscow: Nauka. 1972. P. 7–25. (In Russ.).
2. Gulinskaya intrusion of ultrabasic alkaline rocks / Ed. by N.A. Eliseev and Yu.M. Sheinmann. Moscow: Gosgortekhnizdat, 1961. 274 p. (NIIGA Proceedings, Vol. 122). (In Russ.).
3. *Egorov L.S.* Form, structure and evolution of the Gulinsky massif of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites // Izv. AN USSR. Ser. Geol. 1989. No. 11. P. 41–56. (In Russ.).
4. *Zhabin A.G.* On the structure and sequence of formation of the Gulinsky complex of dunites, ultrabasic and ultrabasic-alkaline lavas, alkaline rocks and carbonatites // Petrology and geochemical features of the complex of ultrabasites, alkaline rocks and carbonatites. Moscow: Nauka, 1965. P. 159–192. (In Russ.).
5. *Sheinmann Yu.M.* On the new petrographic province in the north of the Siberian platform // Izv. AN USSR. Ser. Geol. 1947. No. 1. P. 123–134. (In Russ.).

6. *Kushnir D.G.* New ideas about the deep structure of the Gulinsky ultramafic massif based on geophysical data // *Geophysics*. 2006. No. 1. P. 59–61. (In Russ.).
7. *Afanasenkov A.P., Lygin I.V., Obukhov A.N., Sokolova T.B., Kuznetsov K.M.* Volume reconstruction of tectonic elements of the Yenisei-Khatanga rift system based on the results of complex geological and geophysical interpretation // *Geophysics*. 2017. No. 2. P. 60–70. (In Russ.).
8. *Yaskevich V.I., Yakovlev Yu.K., Chetvergova A.P., Klyuchko V.P., Stepanov V.I.* Results and problems of studying the tectonics of the Western part of the Siberian platform and the Yenisei-Khatanga trough from geological and geophysical data // *Tectonics and oil and gas potential of Siberia and the Far East*. Novosibirsk. 1980. Vol. 10. P. 79–84. (In Russ.).
9. *Kazais V.I., Melnik A.I., Kushnir D.G.* Efficiency of a new stage of regional seismic exploration on Taimyr // *Prospects of Development of the Oil and Gas Production Complex of the Krasnoyarsk Territory: Proceedings of the Conference*. Krasnoyarsk, 2007. P. 70–75. (In Russ.).
10. *Kushnir D.G.* Oil and gas potential of the Taimyr coast based on the results of a new stage of regional work // *Oil and Gas of the Arctic Shelf: Proceedings of the Conference*. Murmansk, 2008. P. 96–99. (In Russ.).
11. *Kushnir D.G.* Effectiveness of regional seismic surveys on Taimyr // *Natural Resources of the Krasnoyarsk Territory*. 2013. No. 18. P. 38–41. (In Russ.).
12. *Kushnir D.G.* Deep geological structure and prospects of oil and gas potential of the Yenisei strip of Taimyr and Gydan // *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*. 2016. Vol. 11, No. 1. P. 8. https://doi.org/10.17353/2070-5379/6_2016 (In Russ.).
13. *Kushnir D.G.* Global geodynamic processes in the light of unique geophysical data obtained in recent years on Taimyr // *Geosochi-2017. Oil and Gas Geology and Geophysics: Proceedings of the Conference*. 2017. P. 59–62. (In Russ.).
14. *Kushnir D.G.* Geodynamics of the Taimyr Peninsula from geophysical data // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2018. Vol. 9, No. 1. P. 81–92. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0338> (In Russ.).
15. *Kushnir D.G., Zhuzhel A.S.* Global geodynamics according to the data of the Taimyr geophysical polygon // *Results of a comprehensive study of the strongest Altai (Chuya) earthquake in 2003, its place among the most important seismic events of the XXI century on the territory of Russia: Proceedings of the 2nd Scientific and Practical Shchukin Conference with International Participation*. Moscow: IFZ RAS, 2018. P. 209–213. (In Russ.).
16. *Kushnir D.G.* Paleozoic swells in the north of central and western Siberia // *Geotectonics*. 2006. Vol. 40, No. 5. P. 399–404.
17. *Vernikovskiy V.A.* Geodynamic evolution of the Taimyr folded region. Novosibirsk: Publishing House of the Sib. Br. of the RAS, SPC UIGGM. 1996. 202 p. (In Russ.).
18. *Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Yu., Matushkin N.Yu., Metelkin D.V., Sovetov Yu.K.* The geodynamic evolution of the folded framing and the western margin of the Siberian craton in the Neoproterozoic: geological, structural, sedimentological, geochronological and paleomagnetic data // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. Vol. 50, No. 4. P. 380–393. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.03.014>
19. *Kostyuchenko S.L.* Structure of the crust and deep mechanisms of formation of the Arctic continental sedimentary basins of Siberia // *Regional Geology and Metallogeny*. 2000. No. 10. P. 125–135. (In Russ.).

20. *Surkov B.C., Smirnov L.V., Zhero O.G.* Early Mesozoic riftogenesis and its influence on the structure of the lithosphere of the West Siberian plate // *Geologiya i Geofizika*. 1987. No. 9. P. 3–11. (In Russ.).
21. *Artyushkov E.V.* Geodynamics. Moscow: Nauka. 1979. 328 p. (In Russ.).
22. *Artyushkov E.V.* Mechanism of formation of superdeep sedimentary basins: lithospheric stretching or eclogitization? // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. Vol. 51, No. 12. P. 1304–1313. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.11.002>
23. *Artyushkov E.V., Chekhovich P.A.* Sea level changes and rapid crustal movements in cratonic areas in the Late Paleozoic // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. Vol. 52, No. 10. P. 1236–1255. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.09.014>
24. *Artyushkov E.V.* Recent uplift of the Earth's crust as a consequence of infiltration into the lithosphere of mantle fluids // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. Vol. 53, No. 6. P. 566–582. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.04.005>
25. *Artyushkov E.V., Korikovskiy S.P., Massonne H.-J., Chekhovich P.A.* Recent crustal uplift of Precambrian cratons: key patterns and possible mechanisms // *Russian Geology and Geophysics*. 2018. Vol. 59, No. 11. P. 1389–1409. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.001>
26. Heat flow map of USSR territory and adjacent areas. Scale 1 : 10,000,000 / Ed. by A.A. Smyslov. St. Petersburg: VSEGEI, MINGEO USSR. 1978. (In Russ.).
27. *Jones A.G.* Electrical properties of the lower continental crust // *Continental lower crust* / Ed. by D.M. Fountain, R.J. Arculus, R.W. Kay. Amsterdam: Elsevier, 1992. P. 81–143.
28. *Pavlenkova N.I.* Development of ideas about seismic models of the Earth's crust // *Geophysics*. 1996. No. 4. P. 11–19. (In Russ.).
29. *Zharkov V.N.* Internal structure of the Earth and planets. Elementary introduction to planetary and satellite Geophysics. Moscow: Nauka i Obrazovanie, 2013. 414 p. (In Russ.).
30. *Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Gontova L.I., Pavlenkova G.A.* Deep structure and geodynamics of the Okhotsk Sea region // *Regional Geology and Metallogeny*. 2018. No. 76. P. 70–82. (In Russ.).
31. *Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Gontova L.I.* Deep disturbances and seismicity of the sea of Okhotsk // *Results of a comprehensive study of the strongest Altai (Chuya) earthquake in 2003, its place among the most important seismic events of the XXI century on the territory of Russia: Proceedings of the XXI Scientific and Practical Shchukin Conference*. Moscow: IFZ RAS, 2018. P. 280–284. (In Russ.).
32. *Belousov V.V.* Fundamentals of geotectonics. 2nd ed. Moscow: Nedra. 1989. 382 p. (In Russ.).
33. *Gzovsky M.V.* Fundamentals of tectonophysics. 1975. 536 p. (In Russ.).
34. *Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Pavlenkova G.A.* The Earth's crust of the deep platform basins in the Northern Eurasia and their origin // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016. Vol. 52, No. 5. P. 770–784. <https://doi.org/10.1134/S1069351316050128>

Усовершенствование петрофизической модели продуктивных отложений Вуктыльского месторождения

Н.А. Скибицкая, И.О. Бурханова*, В.А. Кузьмин, М.Н. Большаков, О.О. Марутян, Н.И. Самохвалов
Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва
E-mail: *burhanova_irina@mail.ru

Аннотация. Вуктыльское нефтегазоконденсатное месторождение Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции было открыто в 1964 г. В настоящее время месторождение находится на завершающей стадии разработки, запасы углеводородов истощаются. С целью расширения ресурсной базы были предприняты исследования, направленные на оценку запасов матричной нефти в газонасыщенной части месторождения. На начальном этапе была уточнена петрофизическая модель продуктивных отложений изучаемого месторождения на основе новых данных.

Ключевые слова: Вуктыльское нефтегазоконденсатное месторождение, петрофизическая модель, низкоемкие коллекторы.

Для цитирования: Скибицкая Н.А., Бурханова И.О., Кузьмин В.А., Большаков М.Н., Марутян О.О., Самохвалов Н.И. Усовершенствование петрофизической модели продуктивных отложений Вуктыльского месторождения // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 28–38. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art2>

Введение

Разрез осадочного чехла Вуктыльского нефтегазоконденсатного месторождения (ВНГКМ) характеризуется наличием двух структурных этажей: верхнего надвинутого – аллохтонного и нижнего – автохтонного [1]. Основным промышленным объектом являются каменноугольно-нижнепермские преимущественно карбонатные отложения, характеризующиеся неоднородностью фильтрационно-емкостных свойств. Среднее давление и температура в залежи в начальных условиях составляли 36,3 МПа и 61 °С. Пластовые воды представлены рассолами хлоркальциевого типа с минерализацией 239–266 г/л. Коллекторы продуктивного разреза сложные и имеют, как правило, вторичную пористость – трещины и каверны.

Утвержденные ГКЗ балансовые запасы газа и конденсата Вуктыльского

месторождения по состоянию на 15 марта 1968 г. составили: 500000 млн м³ свободного газа (категории С₁ и С₂), 185000 тыс. т конденсата (категории С₁ и С₂).

Газонасыщенный разрез пермокарбоновой залежи при подсчете запасов (ПЗ) газа и конденсата 1972 г. был разделен на шесть подсчетных объектов:

I – аргиллиты и мергели верхнеартинского подъяруса, а также переходная пачка пород нижнеартинского подъяруса;

II – известняки нижнеартинского подъяруса и сакмарского яруса;

III – известняки ассельского яруса;

IV – известняки и доломиты московского яруса с включением эффективных мощностей верхнего карбона;

V – известняки и доломиты башкирского и серпуховского ярусов;

VI – известняки визейского яруса.

Промышленная газоносность разреза, включающего подсчетные горизонты II–VI, доказана данными опробования. Продуктивность пород подсчетного горизонта I подтверждена только косвенными данными.

Вуктыльское НГКМ является основным источником сырья Сосногорского газоперерабатывающего завода, однако степень выработанности запасов месторождения очень высока. Одним из путей расширения ресурсной базы месторождения является оценка запасов матричной нефти в газонасыщенной части ВНГКМ. С этой целью была уточнена петрофизическая модель изучаемых продуктивных отложений.

Материалы и методы исследований

За предыдущие годы исследования Вуктыльского НГКМ были накоплены обширные материалы по результатам петрофизических исследований керна – коллекция насчитывает 13769 образцов. При анализе этих данных были исключены образцы, принадлежащие отложениям автохтона, а также образцы, возраст которых не был определен точно. На образцах были выполнены стандартные лабораторные петрофизические исследования: определены коэффициент открытой пористости $K_{п.о.}$, коэффициент абсолютной проницаемости $K_{пр.а.}$, коэффициент остаточной водонасыщенности $K_{в.о.}$, карбонатность $S_{карб.}$, содержание кальцита $S_{кал.}$, доломита $S_{дол.}$, ангидрита $S_{анг.}$ и нерастворимого остатка $S_{но.}$. На части коллекции были выполнены специальные петрофизические исследования.

Для уточнения петрофизической модели были отобраны 775 образцов керна из 12 скважин, из них 398 образцов

исследованы в Петрофизическом центре ИПНГ РАН, остальные – силами сотрудников Филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта (далее – Филиал). Необходимо отметить, что вновь отобранные образцы, в отличие от ранее изученных, не экстрагировались. В исследованной коллекции керна 24 образца принадлежат отложениям автохтона, и при построении петрофизических связей их параметры не учитывались.

На этапе отбора проводилось описание и фотографирование керна в ящиках. Также были сделаны фотографии образцов полноразмерного керна коллекции ИПНГ РАН, проведена подготовка керна к комплексным литолого-петрографическим, петрофизическим, геохимическим и физико-химическим исследованиям.

Для изучаемой коллекции керна были изготовлены шлифы, сделаны их фотографии. Выполнено литологическое и геохимическое (изучение органического вещества) описание пород в шлифах. Структура порового пространства 49 образцов пород была изучена в растровом электронном микроскопе (РЭМ) способом катодolumинесценции.

В комплекс петрофизических исследований коллекции керна Вуктыльского НГКМ входило измерение следующих параметров: коэффициентов открытой пористости по минерализованной воде $K_{п.о.}$, объемной плотности $\delta_{об.}$, коэффициентов абсолютной проницаемости параллельно напластованию $K_{пр.а.}^{||}$, коэффициентов эффективной проницаемости параллельно напластованию $K_{пр.э}^{||}$ (проницаемость образцов в состоянии остаточного водонасыщения), коэффициентов остаточной водонасыщенности $K_{в.о.}$, электрических свойств.

В ИПНГ РАН, помимо вышеописанных исследований, также были оценены коэффициенты остаточной (структурно-защемленной) газонасыщенности $K_{Г.О.}$, коэффициенты абсолютной и эффективной проницаемости перпендикулярно напластованию $K_{ПР.А}^{\perp}$ и $K_{ПР.Э}^{\perp}$, параметры пористости $P_{П}^{\perp}$ и насыщения $P_{Н}^{\perp}$ перпендикулярно напластованию, интегральная гамма-активность полноразмерных образцов керна, интегральная и спектральная (концентрации

U, Th, K) гамма-активность на порошках пород. На образцах коллекции керна, исследованной в Филиале, дополнительно была выполнена карбонатометрия. Вышеперечисленными параметрами были охарактеризованы практически все образцы коллекции.

На основе полученных результатов были рассчитаны коэффициенты эффективной пористости $K_{П.Эф}$ и динамической пористости $K_{П.Д}$:

$$K_{П.Эф} = K_{П.О} (1 - K_{В.О}) = K_{П.О} - WK_{В.О}, \quad (1)$$

$$K_{П.Д} = K_{П.О} (1 - K_{В.О} - K_{Г.О}) = K_{П.О} - WK_{В.О} - W_{Г.О}, \quad (2)$$

где $WK_{В.О}$ – коэффициент объемной остаточной водонасыщенности, $WK_{Г.О}$ – коэффициент объемной остаточной (структурно-защемленной) газонасыщенности.

Таким образом, данные петрофизических исследований керна были разбиты на 3 группы:

- 1 группа – образцы, исследованные в Петрофизическом центре ИПНГ РАН (неэкстрагированные образцы);
- 2 группа – образцы, исследованные в Филиале ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта (неэкстрагированные образцы);

– 3 группа – образцы, исследованные в предыдущие годы (экстрагированные образцы).

Стратиграфические подразделения изучаемого разреза ВНКМ охарактеризованы керна не одинаково широко (табл. 1). По этой причине петрофизические модели были обоснованы для подсчетных объектов II–VI (табл. 2). Результаты изучения образцов из трех групп были проанализированы как отдельно, так и совместно. Основная часть изученных образцов принадлежит породам московского яруса, в связи с чем в статье приводятся петрофизические сопоставления для отложений IV объекта.

Таблица 1

Характеристика коллекции керна по представительности стратиграфических подразделений продуктивных отложений автохтона Вуктыльского НКМ (1 группа – данные ИПНГ РАН, 2 группа – данные Филиала, 3 группа – данные предыдущих исследований)

Объект ПЗ	Возраст отложений (аллохтон)	Обозначение	Количество образцов		
			1 гр.	2 гр.	3 гр.
1	2	3	4	5	6
–	Кунгурский ярус нижней перми	P _{1k}	–	–	21
I	Верхнеартинский подъярус артинского яруса нижней перми	P _{1ar2}	–	–	48
II	Нижнеартинский подъярус артинского яруса нижней перми	P _{1ar1}	7	8	529
	Сакмарский ярус нижней перми	P _{1s}	24	21	771

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
III	Ассельский ярус нижней перми	P1a	40	39	816
IV	Верхний карбон	C3	8	8	234
	Нижний подъярус московского яруса среднего карбона	C2m1	155	149	2472
V	Нерасчлененная толща башкирского яруса и нижнего подъяруса московского яруса среднего карбона	C2b+m1	5	5	–
	Башкирский ярус среднего карбона	C2b	7	6	410
	Верхний подъярус серпуховского яруса нижнего карбона	C1s2	33	29	1282
	Нижний подъярус серпуховского яруса нижнего карбона	C1s1	9	8	682
	Серпуховский ярус нижнего карбона	C1s	14	14	–
VI	Алексинский и михайловско-веневский горизонты верхнего подъяруса визейского яруса нижнего карбона	C1al+mh+vn	63	66	1254
	Тульский горизонт верхнего подъяруса визейского яруса нижнего карбона	C1tl	13	10	519
	Нерасчлененная толща бобриковского горизонта нижнего подъяруса визейского яруса и тульского горизонта верхнего подъяруса визейского яруса нижнего карбона	C1bb+tl	5	5	–
	Бобриковский и радаевский горизонты нижнего подъяруса визейского яруса нижнего карбона	C1rd+bb	–	–	1056
–	Верхний подъярус турнейского яруса нижнего карбона	C1t2	–	–	34
Общее количество образцов			383	368	10128

Таблица 2

Характеристика пород Вуктыльского НГКМ по средним значениям коэффициентов открытой пористости, остаточной водонасыщенности и эффективной пористости по керну (1 группа – данные ИПНГ РАН, 2 группа – данные Филиала, 3 группа – данные предыдущих исследований)

Объекты	Возраст	K _{п.о.} , %			K _{в.о.} , %			K _{п.эф.} , %		
		1 гр.	2 гр.	3 гр.	1 гр.	2 гр.	3 гр.	1 гр.	2 гр.	3 гр.
II объект	P _{1aг1} , P _{1s}	1,6	1,2	1,2	63,6	83,9	67,8	0,69	0,17	0,55
III объект	P _{1a}	1,5	1,6	1,5	53,4	82,1	66,0	0,71	0,22	0,84
IV объект	C ₃ , C _{2m}	2,0	2,1	4,3	59,3	85,8	45,6	1,03	0,36	4,72
V объект	C _{2b} , C _{1s}	3,2	3,6	2,4	55,5	87	58,5	1,77	0,66	1,48
VI объект	C _{1v}	1,7	1,4	1,6	58,8	77,4	65,5	0,89	0,29	0,55

Сравнение результатов измерений 2-й группы завышены (см. табл. 2), на образцах трех групп показало, поэтому при анализе не что величины K_{в.о.} образцов из использовались.

Характеристика коллекции керн

Согласно результатам карбонатометрии 2-й группы образцов, в изучаемом разрезе встречаются известняки, доломиты, их переходные разности. Минимальным содержанием нерастворимого остатка характеризуются породы IV объекта, максимальным – породы II объекта (в эту величину входят содержание сульфатов, кремния, глин, терригенной составляющей).

Отобранный керн, в основном, плотный, исследованные образцы характеризуются низкими значениями коэффициентов

пористости (см. табл. 2; табл. 3). Коэффициенты остаточной водонасыщенности и остаточной (структурно-защемленной) газонасыщенности образцов 1-й группы варьируются в широких пределах (см. табл. 2). Средние значения $K_{в.о}$ существенно превышают величины $K_{г.о}$, что свидетельствует о преобладании образцов с субкапиллярно-поровой структурой порового пространства в изученной коллекции [2]. Этот вывод подтверждается результатами исследований образцов растровым электронным микроскопом.

Таблица 3

Характеристика коллекции образцов пород Вуктыльского НГКМ, исследованной в Петрофизическом центре ИПНГ РАН

Объекты	Возраст	$K_{п.о}, \%$			$K_{в.о}, \%$			$K_{п.эф}, \%$		
		мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
II объект	P_{1ar1}, P_{1s}	0,3	4,6	1,6	22,0	91,4	63,6	0,1	3,6	0,7
III объект	P_{1a}	0,2	5,7	1,5	16,9	79,4	53,4	0,1	3,3	0,7
IV объект	C_3, C_{2m}	0,1	13,6	2,0	3,2	94,5	59,3	0,0	11,9	1,0
V объект	C_{2b}, C_{1s}	0,5	13,9	3,2	2,2	85,8	54,5	0,1	11,0	1,8
VI объект	C_{1v}	0,3	6,7	1,7	2,8	89,7	58,8	0,1	5,5	0,9

Продолжение таблицы 3

Объекты	Возраст	$K_{г.о}, \%$			$K_{п.д}, \%$			$K_{пр.а}^{ }, 10^{-15} м^2$		
		мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.
1	2	12	13	14	15	16	17	18	19	20
II объект	P_{1ar1}, P_{1s}	0,6	45,0	12,6	0,0	1,5	0,4	0,04	0,13	0,07
III объект	P_{1a}	2,4	77,7	17,8	0,0	2,2	0,4	0,04	0,29	0,07
IV объект	C_3, C_{2m}	0,1	85,4	17,2	0,0	2,4	0,5	0,03	0,32	0,07
V объект	C_{2b}, C_{1s}	0,7	63,9	20,4	0,1	3,2	0,8	0,04	1,15	0,15
VI объект	C_{1v}	1,5	77,0	15,3	0,0	2,0	0,5	0,03	0,36	0,08

Образцы 1-й группы были изготовлены в форме кубиков, что позволило изучить анизотропию пород по электрическим свойствам и проницаемости. Было выявлено, что величины $K_{пр.а}^{\perp}$ ниже величин $K_{пр.а}^{||}$, в среднем, на 10%. Средняя разница значений $K_{пр.э}^{\perp}$ и $K_{пр.э}^{||}$ составляет 11%. При анализе электрических свойств также наблюдается анизотропия при сопоставлении величин параметров пористости ($P_{п}^{||}$ и $P_{п}^{\perp}$),

параметров относительного сопротивления ($P_0^{||}$ и P_0^{\perp}) и параметров электрической извилистости ($T_3^{2||}$ и $T_3^{2\perp}$). При сопоставлении величин параметров пористости ($P_{п}^{||}$ и $P_{п}^{\perp}$), параметров относительного сопротивления ($P_0^{||}$ и P_0^{\perp}) и параметров электрической извилистости ($T_3^{2||}$ и $T_3^{2\perp}$), измеренных перпендикулярно и параллельно напластованию, также наблюдается анизотропия.

Из образцов 1-й группы всего 69 характеризуются значениями $K_{ПР.А}^{II}$ выше $0,1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Такие низкие величины связаны с тем, что в изучаемой коллекции представлены, в основном, породы с $K_{П.О}$ ниже 3%. Кроме того, при измерении $K_{ПР.А}^{II}$ на образцах оценивается матричная проницаемость, в то время как значительная часть коллекторов Вуктыльского НГКМ обладает также трещинной проницаемостью.

Петрофизическая модель

В изучаемом разрезе представлены различные типы коллекторов, что отражается

на петрофизических зависимостях. На рис. 1, а представлено сопоставление коэффициентов остаточной водонасыщенности $K_{В.О}$ с коэффициентами открытой пористости $K_{П.О}$. Разброс точек на данном сопоставлении свидетельствует о наличии в коллекции керн образцов с разным размером пор. Известно, что при равных величинах открытой пористости породы с меньшим размером пор будут характеризоваться более высокими значениями $K_{В.О}$, чем породы с крупными порами.

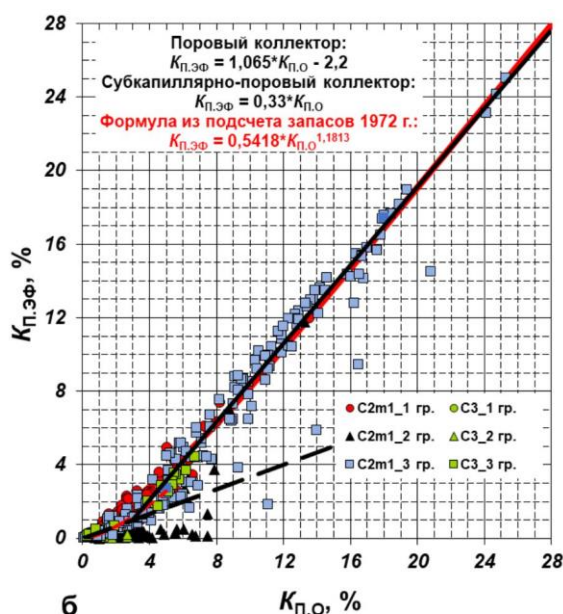
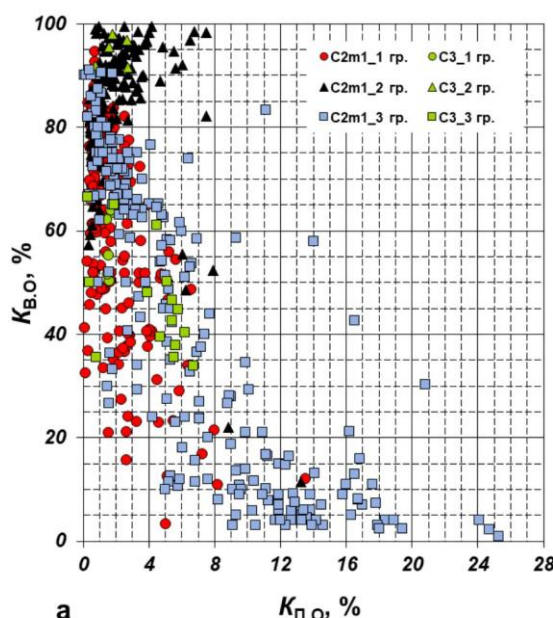


Рис. 1. Сопоставление коэффициентов остаточной водонасыщенности и открытой пористости (а) и коэффициентов эффективной пористости и открытой пористости (б) для отложений IV объекта продуктивных отложений Вуктыльского НГКМ

Исследования ИПНГ РАН показали, что величина параметра $K_{Г.О}$ также определяется структурой емкостного (порового) пространства породы, однако здесь наблюдается противоположная зависимость – чем крупнее пора, тоньше поровый канал и чем выше единицы отношение величин диаметра пор к диаметру

каналов $d_{пор}/d_{кан}$, тем больше будет объем структурно-защемленного газа в емкостном объеме пород [2]. Таким образом, для пород с разным размером пор и каналов и соотношением $d_{пор}/d_{кан}$ следует обосновывать индивидуальные зависимости не только $K_{П.Эф} = f(K_{П.О})$, но и $WK_{Г.О} = f(K_{П.О})$ (рис. 1, б; 2, б).

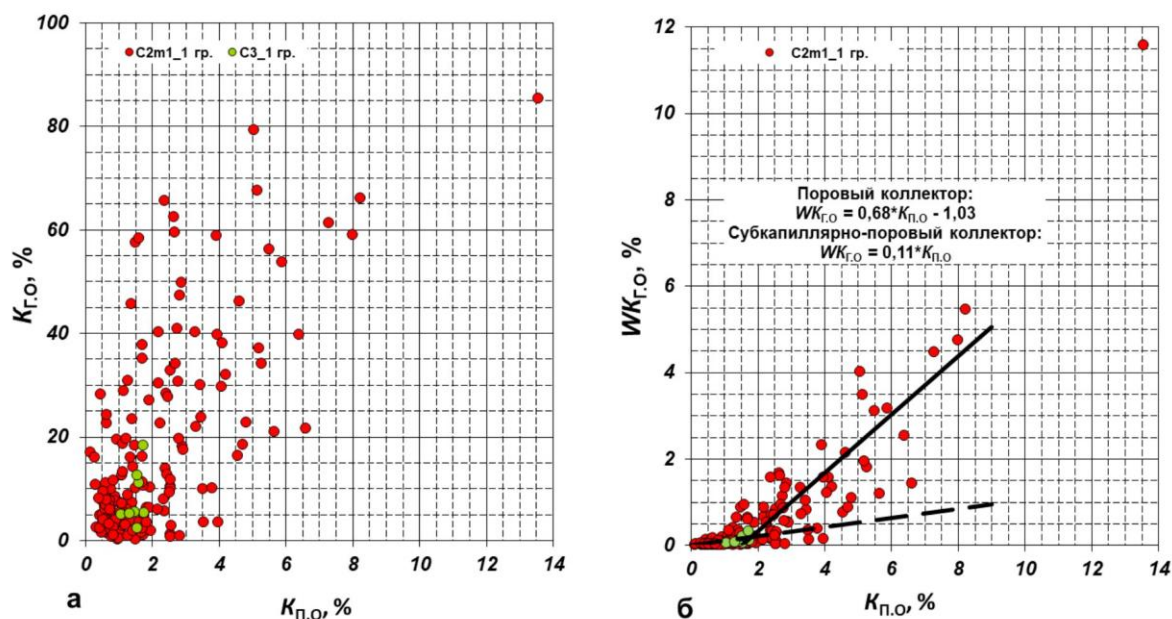


Рис. 2. Сопоставление коэффициентов остаточной (защемленной) газонасыщенности и открытой пористости (а) и коэффициентов объемной остаточной (защемленной) газонасыщенности и открытой пористости (б) для отложений IV объекта продуктивных отложений Вуктыльского НГКМ

В связи с вышеизложенным, для каждого из подсчетных объектов Вуктыльского НГКМ были обоснованы петрофизические связи для двух основных типов коллектора: поровые

с капиллярным размером пор (далее – поровые) и поровые с субкапиллярным размером пор (далее – субкапиллярно-поровые) (см. рис. 1, 2; табл. 4).

Таблица 4

Связи коэффициентов эффективной пористости, объемной остаточной (структурно-защемленной) газонасыщенности и динамической пористости с коэффициентом открытой пористости для подсчетных объектов Вуктыльского НГКМ

Объект ПЗ (возраст)	Тип коллектора	
	Поровый	Субкапиллярно-поровый
II объект (P _{1ar2} , P _{1ar1} и P _{1s})	$K_{п.эф} = 0,27 \cdot K_{п.о}^{1,43}$	$K_{п.эф} = 0,33 \cdot K_{п.о}$
	$WK_{г.о} = 0,275 \cdot K_{п.о} + 0,1$	$WK_{г.о} = 0,11 \cdot K_{п.о}$
	$K_{п.д} = K_{п.о} - 5,4$	$K_{п.д} = 0,22 \cdot K_{п.о}$
III объект (P _{1a})	$K_{п.эф} = 0,85 \cdot K_{п.о} - 1,79$	$K_{п.эф} = 0,27 \cdot K_{п.о}$
	$WK_{г.о} = 0,48 \cdot K_{п.о} - 0,35$	$WK_{г.о} = 0,1 \cdot K_{п.о}$
	$K_{п.д} = 0,37 \cdot K_{п.о} - 1,44$	$K_{п.д} = 0,17 \cdot K_{п.о}$
IV объект (C ₃ и C _{2m1})	$K_{п.эф} = 1,065 \cdot K_{п.о} - 2,2$	$K_{п.эф} = 0,33 \cdot K_{п.о}$
	$WK_{г.о} = 0,68 \cdot K_{п.о} - 1,03$	$WK_{г.о} = 0,11 \cdot K_{п.о}$
	$K_{п.д} = 0,385 \cdot K_{п.о} - 1,17$	$K_{п.д} = 0,22 \cdot K_{п.о}$
V объект (C _{2b} , C _{1s2} и C _{1s1})	$K_{п.эф} = K_{п.о} - 2$	$K_{п.эф} = 0,33 \cdot K_{п.о}$
	$WK_{г.о} = 0,5 \cdot K_{п.о} - 0,5$	$WK_{г.о} = 0,11 \cdot K_{п.о}$
	$K_{п.д} = 0,5 \cdot K_{п.о} - 1,5$	$K_{п.д} = 0,22 \cdot K_{п.о}$
VI объект (C _{1al+mh+vn} , C _{1tl} , C _{1tl+bb})	$K_{п.эф} = 0,857 \cdot K_{п.о} - 1,843$	$K_{п.эф} = 0,33 \cdot K_{п.о}$
	$WK_{г.о} = 0,65 \cdot K_{п.о} - 0,7$	$WK_{г.о} = 0,17 \cdot K_{п.о}$
	$K_{п.д} = 0,207 \cdot K_{п.о} - 1,143$	$K_{п.д} = 0,16 \cdot K_{п.о}$

Помимо вышеописанных связей петрофизические зависимости были построены следующие

$$K_{П.Д} = f(K_{П.О}), K_{П.Д} = f(K_{П.ЭФ}), K_{ПР.А}^{II} = f(K_{П.О}), K_{ПР.А}^{\perp} = f(K_{П.О}), K_{ПР.ЭФ}^{II} = f(K_{П.О}), K_{ПР.ЭФ}^{\perp} = f(K_{П.О}), K_{ПР.А}^{II} = f(K_{П.ЭФ}), K_{ПР.А}^{\perp} = f(K_{П.ЭФ}), K_{ПР.ЭФ}^{II} = f(K_{П.ЭФ}), K_{ПР.ЭФ}^{\perp} = f(K_{П.ЭФ}), P_{П}^{II} = f(K_{П.О}), P_{П}^{\perp} = f(K_{П.О}), P_{Н}^{II} = f(K_{В.О}), P_{Н}^{\perp} = f(K_{В.О}), P_0^{II} = f(K_{П.О}), P_0^{\perp} = f(K_{П.О}), T_3^{2II} = f(K_{П.О}), T_3^{2\perp} = f(K_{П.О}).$$

На рис. 3 показаны сопоставления $K_{ПР.А}^{II}$ и $K_{ПР.ЭФ}^{II}$ с $K_{П.О}$ для отложений IV объекта продуктивных отложений Вуктыльского НГКМ.

Между горизонтальными пунктирными линиями расположены точки, соответствующие образцам с матричной проницаемостью.

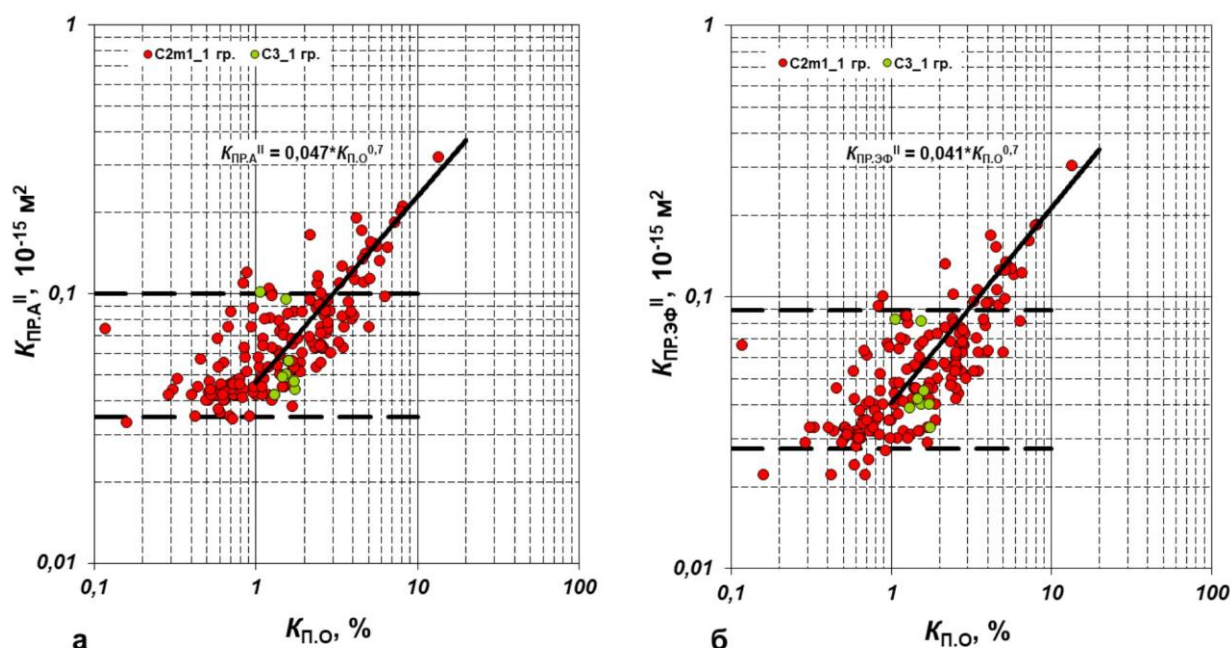


Рис. 3. Сопоставление коэффициентов абсолютной проницаемости пород по газу параллельно напластованию $K_{ПР.А}^{II}$ (а) и коэффициентов эффективной проницаемости пород по газу параллельно напластованию $K_{ПР.ЭФ}^{II}$ (б) с коэффициентами открытой пористости для отложений IV объекта продуктивных отложений Вуктыльского НГКМ

На сопоставлениях $P_{П}$ с $K_{П.О}$ были выявлены отдельные связи для пород с $K_{П.О} < 3\%$ и $K_{П.О} \geq 3\%$ (II, III и V объекты), $K_{П.О} < 2\%$ и $K_{П.О} \geq 2\%$ (I объект), $K_{П.О} < 6\%$ и $K_{П.О} \geq 6\%$ (IV объект) (рис. 4, а). Часть образцов проявляют себя как трещиноватые пониженными величинами $P_{П}$, часть – повышенными величинами $P_{П}$ как кавернозные породы. Сопоставления $P_{Н} = f(K_{В.О})$ каждого объекта подсчета

запасов характеризуются большим разбросом точек, который свидетельствует как о возможных различиях в степени гидрофобизации пород, так и о сложности структуры емкостного пространства этих пород (рис. 4, б). Показатель смачиваемости n (показатель степени в уравнении $P_{Н} = K_{В.О}^n$) варьируется в широких пределах от 0,35 до 10.

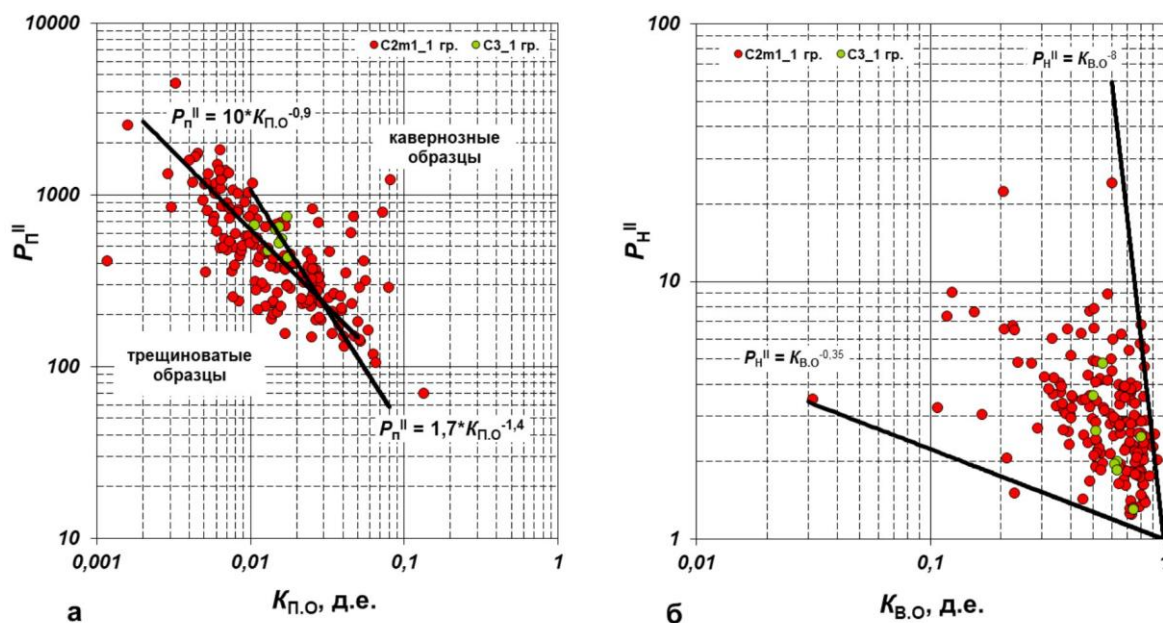


Рис. 4. Сопоставление параметров пористости пород параллельно напластованию с коэффициентами открытой пористости (а) и параметров насыщения пород параллельно напластованию с коэффициентами остаточной водонасыщенности (б) для отложений IV объекта продуктивных отложений Вуктыльского НГКМ

Типы коллекторов

При подсчете запасов газа и конденсата Вуктыльского месторождения 1972 г. были выделены три группы коллекторов: тонкопорово-микрокаверново-трещинные (коэффициент пористости $0,1\% \leq K_{п} < 3\%$, коэффициент абсолютной проницаемости $0,0001 \leq K_{пр.а} < 0,09 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$), порово-микрокаверново-трещинные ($3\% \leq K_{п} < 6\%$, $0,0005 \leq K_{пр.а} < 0,85 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$), трещинно-микрокаверново-поровые ($K_{п} \geq 6\%$, $0,11 \leq K_{пр.а} < 4500 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$). По данным разработки и профилям притока было установлено, что основную емкость газоконденсатного резервуара залежи составляют коллекторы третьей группы ($K_{п} \geq 6\%$). Для поровых коллекторов всех стратиграфических подразделений были обоснованы граничные значения пористости (6%) и проницаемости (0,1 мД) [3].

В уточненной постоянно действующей геолого-технологической

модели Вуктыльского НГКМ (Филиал ООО «ВНИИГАЗ» в г. Ухта), построенной в 2010 г., выделены следующие типы коллекторов: низкоемкий порово-трещинный ($3\% \leq K_{п} < 6\%$), высокоемкий поровый ($K_{п} \geq 6\%$), смешанный, включающий кавернозно-поровый ($K_{п} \geq 6\%$).

Таким образом, ранее низкоемкие породы считались коллекторами только при наличии трещин или микрокаверн. Согласно вышеописанным результатам петрофизических исследований, породы III, IV, V и VI объектов характеризуются величиной $K_{пр.а}^{II}$ выше $0,1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ при $K_{п.о}$ от 3% (см. рис. 3, а). То есть низкоемкие породы без вторичной пористости также являются коллекторами. Среди высокоемких поровых коллекторов с $K_{п} \geq 6\%$ также следует выделять породы с субкапиллярным размером пор (поровые слабопроницаемые).

Заключение

На основе анализа новой петрофизической информации в совокупности с результатами предыдущих исследований была усовершенствована петрофизическая модель продуктивных отложений Вуктыльского НГКМ. Исследование фильтрационных и электрических свойств образцов параллельно и перпендикулярно напластованию выявило анизотропию этих свойств. Установлено, что проницаемость и удельное электрическое сопротивление пород в направлении, перпендикулярном напластованию, соответственно ниже и выше, в среднем, на 10%.

Изучение структуры порового пространства образцов в растровом электронном микроскопе способом катодolumинесценции в РЭМ и результаты петрофизических исследований позволили выделить два основных типа коллекторов: поровые с капиллярным размером пор и поровые с субкапиллярным размером пор. Для пяти подсчетных объектов Вуктыльского НГКМ были обоснованы индивидуальные

петрофизические связи с учетом типа коллектора.

График функции связи параметра пористости P_{Π} с коэффициентом пористости $K_{\Pi.O}$ $P_{\Pi} = f(K_{\Pi.O})$ имеет характерный изгиб в точке, разделяющий породы с разной преимущественной структурой емкостного пространства. На вид данного сопоставления сильно влияет наличие трещин и каверн. Функции $P_H = f(K_{B.O})$ дифференцировать не удалось по причине сложности структуры емкостного пространства изучаемых отложений и преимущественной приуроченности пород к интервалу гидрофобных свойств с разной степенью гидрофобизации.

Анализ данных оценки фильтрационно-емкостных свойств неэкстрагированных образцов Вуктыльского НГКМ, полученных в Петрофизическом центре ИПНГ РАН, позволил выделить ранее не рассматривавшиеся при подсчете запасов типы коллекторов – низкоемкий поровый ($3\% \leq K_{\Pi} < 6\%$) и высокоемкий поровый слабопроницаемый ($K_{\Pi} \geq 6\%$).

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема: «Прогноз состояния ресурсной базы нефтегазового комплекса России на основе системных исследований перспектив нефтегазоносности природных резервуаров в карбонатных, терригенных и сланцевых формациях», № АААА-А19-119030690047-6).

Литература

1. Белонин М.Д., Прищепина О.М., Теплов Е.Л., Буданов Г.Ф., Данилевский С.А. Тимано-Печорская провинция: геологическое строение, нефтегазоносность и перспективы освоения. СПб.: Недра, 2004. 396 с.
2. Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А., Большаков М.Н., Марутян О.О. Влияние микроструктурных параметров карбонатных пород продуктивных отложений на остаточную нефтегазонасыщенность // Нефтяное хозяйство. 2010. № 12. С. 98–101.
3. Гриценко А.М., Николаев В.А., Тер-Саркисов Р.М. Компонентоотдача пласта при разработке газоконденсатных залежей. М.: Недра, 1995. 264 с.

Improved petrophysical model for the productive layers of the Vuktyl field

N.A. Skibitskaya, I.O. Burkhanova*, V.A. Kuzmin, M.N. Bolshakov, O.O. Marutyan, N.I. Samokhvalov

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: *burhanova_irina@mail.ru

Abstract. The Vuktyl oil and gas condensate field of the Timan-Pechora province was discovered in 1964. The field is currently in the final stages of development, its hydrocarbon reserves are nearly exhausted. In order to expand the resource base of the field, research was undertaken to estimate the matrix oil reserves in the gas-saturated part of the Vuktyl oil and gas condensate field. At the first stage, the petrophysical model of productive deposits of the studied field was improved using new data.

Keywords: Vuktyl oil and gas condensate field, petrophysical model, low-pore reservoirs.

Citation: Skibitskaya N.A., Burkhanova I.O., Kuzmin V.A., Bolshakov M.N., Marutyan O.O., Samokhvalov N.I. Improved petrophysical model for the productive layers of the Vuktyl field // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 28–38. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art2> (In Russ.).

References

1. Belonin M.D., Budanov G.F., Danilevskii S.A., Prishchepa O.M., Teplov E.L. Timan-Pechora province: geological structure, oil and gas potential and development prospects. St. Petersburg: Nedra, 2004. 396 p. (In Russ.).
2. Skibitskaya N.A., Kuzmin V.A., Bolshakov M.N., Marutyan O.O. The influence of microstructure parameters of carbonate rocks of productive deposits on the residual oil and gas saturation // Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry. 2010. No. 12. P. 98–101. (In Russ.).
3. Gritsenko A.I., Nikolaev V.A., Ter-Sarkisov R.M. Component recovery of a stratum during gas-condensate field development. Moscow: Nedra, 1995. 264 p. (In Russ.).

Совершенствование аспирационного термомассометрического метода определения форм и видов связи воды, насыщающей породу

Н.А. Скибицкая, В.А. Кузьмин, М.Н. Большаков*, О.О. Марутян, Е.Г. Доманова

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: *rgu2006@mail.ru

Аннотация. Существующая лабораторная установка аспирационной термомассометрии, основанная на измерении массы и температуры в процессе изотермической сушки образца породы в потоке воздуха, удовлетворяет петрофизическим задачам изучения коллекторов нефти и газа. В то же время она имеет потенциал повышения точности исследований. В работе предложена модифицированная установка для изучения свойств водонасыщенных и углеводородонасыщенных пород, которая за счет своей конструкции повышает точность измерения.

Ключевые слова: аспирационная термомассометрия, изотермическая сушка, кривые сушки, связанная вода, остаточная вода, вода углов пор, вода микрокапилляров, структурно заземленная вода, фуникулярная вода, поры, коллекторы.

Для цитирования: Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А., Большаков М.Н., Марутян О.О., Доманова Е.Г. Совершенствование аспирационного термомассометрического метода определения форм и видов связи воды, насыщающей породу // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 39–50. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art3>

Формирование нефтяных месторождений и их разработка неразрывно связаны с наличием в емкостном объеме коллекторов воды, которая находится в сложном состоянии и меняет свои физические свойства в зависимости от форм и видов связи воды с породообразующим веществом. Согласно общепринятой концепции, состояние остаточной воды и начальное распределение нефти, воды и газа в пласте определяются различными факторами: структурой порового пространства, физико-химическими свойствами пород, количеством и составом остаточной воды и др. Количество остаточной воды, заполняющей часть открытого емкостного пространства, определяет величину коэффициентов остаточной водонасыщенности ($K_{во}$), нефте-

и газонасыщенности (K_n , K_g) и эффективной пористости, используемых при подсчете запасов. В гидрофильных коллекторах остаточная вода содержится в виде пленки прочно- и рыхлосвязанной воды на стенках пор, воды углов пор и микрокапилляров, в виде энергетически не связанной, структурно-заземленной воды в центральной части пор, и определяет собой неснижаемую остаточную водонасыщенность [1].

Унификация форм воды и видов связи воды с породой находит свое отражение в различных классификациях. В гидрогеологии и инженерной геологии принята классификация, которая была предложена А.Ф. Лебедевым (1930 г.) и получила дальнейшее развитие в трудах В.Д. Ломтадзе, Е.М. Сергеева и др. [2–5].

В современном представлении вода в емкостном объеме гидрофильных пород подразделяется на:

- физико-химически прочно- и рыхлосвязанную, формирующую двойной слой;
- физически или менисково-связанную – вода углов пор, вода микрокапилляров;
- энергетически свободную, структурно-защемленную в центральной части пор, во все более увеличивающемся объеме при укрупнении пор и увеличении отношения диаметра пор к диаметру каналов более единицы ($d_{\text{пор}}/d_{\text{кан}} > 1$);
- фуникулярную – непрерывной связанности в динамическом, фильтрующем емкостном объеме коллектора.

В нефтенасыщенном или газонасыщенном коллекторе динамический или фильтрующий емкостной объем заполнен частично или полностью природным газом или нефтью. Приуроченность пластовых флюидов, газа, нефти, воды к динамической части емкостного объема породы-коллектора указывает на непрерывную, фуникулярную связанность каждого из флюидов в этом объеме и на возможность двухфазной (газ-вода, нефть-вода) или даже трехфазной (газ-нефть-вода) фильтрации этих пластовых флюидов в процессе добычи углеводородов. Результаты исследований свойств, формы и видов связи воды в водонасыщенных и нефтегазонасыщенных породах опубликованы в работах [1–8].

Точное определение объема остаточной воды в образцах пород является достаточно сложной задачей. Этим объясняется наличие различных методов ее определения. В петрофизической практике лабораторных исследований для определения

остаточной воды, как правило, применяют методы центрифугирования, капиллярных давлений, прямые методы (способ Закса) определения остаточной водонасыщенности парафинированного или герметизированного керна, отобранного при бурении скважин на РНО. Для более дифференцированной оценки водонасыщенности пород, как в водоносных пластах, так и в продуктивных отложениях нефтяных, нефтегазоконденсатных и нефтяных месторождений требуется более детальное изучение форм и видов связи с породой воды, насыщающей емкостные объемы породы. При этом важно выяснить и качественную роль различных форм воды, так как при разработке залежей водонасыщенность оказывает большое влияние на процессы извлечения углеводородов из порового объема.

Известно, что вода, содержащаяся в породе, в зависимости от форм связи ее с породой имеет разные физические свойства, такие, как электрическое сопротивление, гидродинамическая подвижность, диэлектрическая проницаемость и др. Естественно, что прежде чем использовать сведения о свойствах породы при некотором количестве воды в ней (неснижаемом в условиях опыта, либо остаточной в условиях пласта), важно знать состояние, в котором эта вода находится в породе.

В практике промысловой геофизики в основу интерпретации скважинных данных заложено количественное определение содержания воды в породе. Качественное ее состояние учитывается результатами петрофизических исследований, оценивающих поверхностную проводимость, обменную емкость, диффузионно-адсорбционную активность и т.д.

В лабораториях физики пласта, как правило, определяется количество неснижаемой воды (равновесной в условиях опыта), которой придается смысл «остаточной водонасыщенности». Причем, достигаемые количества неснижаемой водонасыщенности зависят от возможности применяемых методов, т.е. от сил, с которыми вода удаляется из образца. В промысловой геофизике результаты этих методов используют для построения корреляционных связей. Влагосодержание пород можно разделить на область влажного состояния и область гигроскопического состояния [9]. Существующие петрофизические методы определения водонасыщенности, как правило, не позволяют оценить физическое состояние воды во всем диапазоне влажности породы – в области гигроскопического и в области влажного состояния. Так, стандартный метод капилляриметрии с полупроницаемой мембраной ограничен низким давлением прорыва мембран, а поэтому позволяет изучить изменение водонасыщенности пород только в области влажного состояния. Область гигроскопического состояния изучается с помощью изотерм адсорбции [10]. Методы, перекрывающие весь диапазон влажности пород, существуют и включают в себя:

1) метод изотермической сушки в потоке воздуха по Мессеру [11], усовершенствованный Л.К. Танкаевой [12];

2) метод сушки над хлористым кальцием, названный С.И. Шишигиным сорбционным [13];

3) метод определения связанной воды по электрическому сопротивлению, предложенный С.И. Долговым в 1948 г. для грунтов [14] и С.И. Шишигиным и С.И. Конюховым – для горных пород [15];

4) метод ядерно-магнитного резонанса.

Однако по этим методам не установлен четкий критерий границы между свободной и связанной водой.

В этой связи, особое место занимают методы изучения разных форм и видов связи с породой воды, насыщающей породу, основанные на регистрации энергетических эффектов при изменении фазового состояния. Одним из таких способов является термографический метод изотермической сушки, который был теоретически обоснован М.Ф. Казанским [16]. В дальнейшем метод был модифицирован Я.Р. Морозовичем и Н.А. Скибицкой, которыми была разработана модифицированная установка аспирационной термомассометрии (АТММ) [17]. В установке реализована возможность одновременной фиксации веса образца и температуры поверхности образца в процессе его изотермической сушки термопарным четырехточечным устройством-держателем в потоке воздуха в аэродинамической трубе. Разработанный специальный хромель-копелевый датчик-держатель позволил обеспечить свободный обдув всей поверхности образца при одновременном непрерывном точном взвешивании и измерении температуры образца, помещенного в поток воздуха постоянной скорости и постоянной температуры [18].

В данной установке [17], фактически, были объединены возможности методов Мессера (в усовершенствованном Л.К. Танкаевой варианте) и М.Ф. Казанского. Принципиально это дало возможность разделять по видам и формам связи с породой воду, насыщающую образцы ненарушенной структуры (цилиндрические, кубические), на которых изучается комплекс петрофизических, структурно-емкостных, физико-химических и стендовых исследований свойств пород.

Как результат, была создана установка АТММ, в которой предварительно насыщенный дистиллированной водой пористый образец высушивается в аэродинамической трубе в потоке воздуха постоянной скорости (0,5 м/сек) и температуры (25 °С) и при этом измеряется изменение массы, пересчитанное в изменение коэффициента водонасыщенности, и температуры поверхности образца во времени. В установке АТММ осуществляется одновременная запись кривых изменения массы (кривая сушки), температуры образца и дифференциальной температуры (Δt – разности между температурой воздуха и температурой образца) во времени (термограмма сушки). Это позволяет разделить остаточную воду на виды по степени ее энергетической и структурной связанности с породой. Кривые

кинетики сушки при этом расчленяются на ряд четких интервалов, отвечающих изменению условий тепломассопереноса в водонасыщенных образцах по мере удаления из них воды различных форм и видов связи с породой (рис. 1). Интерпретация полученных данных по сушке образца осуществляется следующим образом. Точка θ_{M1} на термограмме (см. рис. 1) сушки является критической точкой деления влагосодержания материала на область влажного состояния материала и область гигроскопического состояния.

Значение влажности образца в точке θ_{M1} отвечает на изотерме адсорбции максимальному гигроскопическому влагосодержанию при равновесной влажности $p/p_s=1$ (давление насыщенных паров воды). В состоянии такой влажности у образца целиком заполнены все микрокапилляры ($r > 10^{-5}$ см).

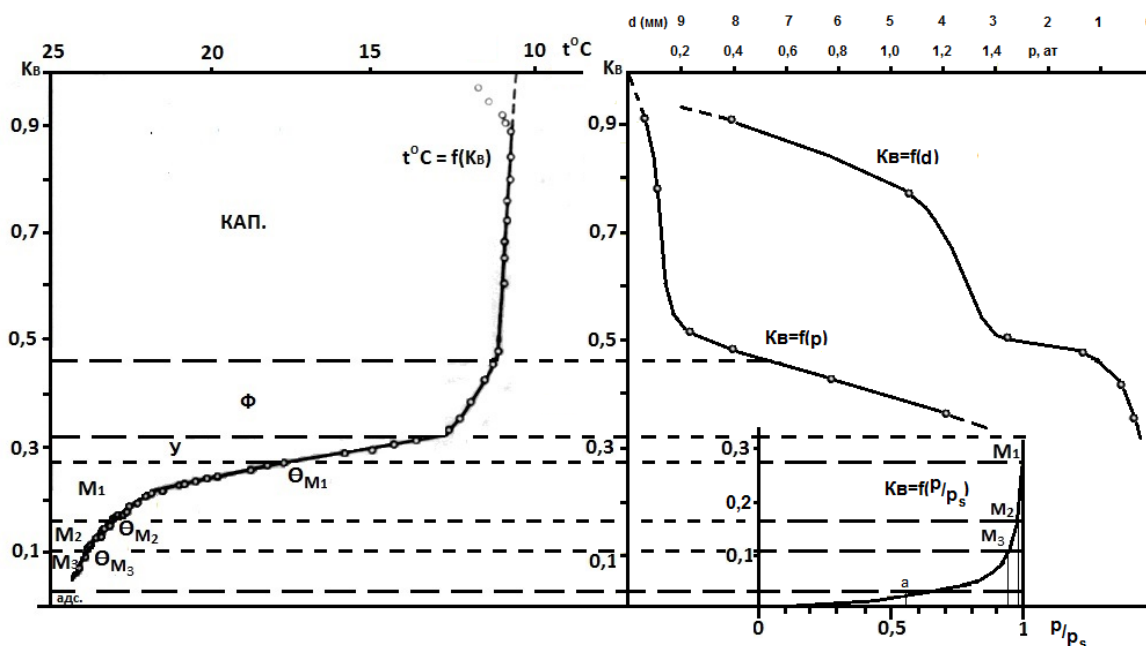


Рис. 1. Сопоставление термомассометрической кривой $t\text{ }^{\circ}\text{C}=f(K_{\text{в}})$ с изотермой адсорбции $K_{\text{в}}=f(p/p_s)$, с кривой капиллярных давлений $K_{\text{в}}=f(p)$ и с порометрической кривой $K_{\text{в}}=f(d_{\text{кап}})$. Обр. УБ-510, Усть-Балыкское месторождение, пласт БIV. Условные обозначения (интерпретация по Скибицкой Н.А.): КАП. – водонасыщенность образца, соответствующая содержанию в образце энергетически не связанной с породой структурно-защемленной в порах капиллярной воды (или воды, осмотически связанной в глинистом цементе); Ф – непрерывно связанной (фуникулярной или канатной) воды; У – воды углов пор (стыковой); M_1 , M_2 , M_3 – воды микрокапилляров 1-ой, 2-ой, 3-ей групп; адс./а – воды адсорбированной

Интервал $\theta_{M1}\theta_a$ на термограмме сушки описывает период испарения из образца влаги микрокапилляров ($r > 10^{-5}$ см). Нижняя граница этого интервала определяется по М.Ф. Казанскому [16] концом гистерезисного участка изотерм адсорбции-десорбции. Т. е. на изотермах адсорбции точка «а» соответствует началу капиллярной конденсации, а в форме уравнения БЭТ – эта точка означает начало отклонения от линейного участка. Таким образом, максимальным радиусом микрокапилляров выделенного участка будет радиус $r \leq 10^{-5}$ см.

Минимально возможным радиусом микрокапилляров участка будет радиус капилляров r , больший чем два диаметра молекул воды ($r > 2D$). Это означает, что если $r = 2D$, то конденсация паров воды в капиллярах невозможна. На рис. 2 показан пример массометрической и термометрической кривых сушки и интервалы различного энергетического и физико-механического состояний воды в образце породы из продуктивных нижнемеловых отложений пласта БV Усть-Балыкского нефтяного месторождения.

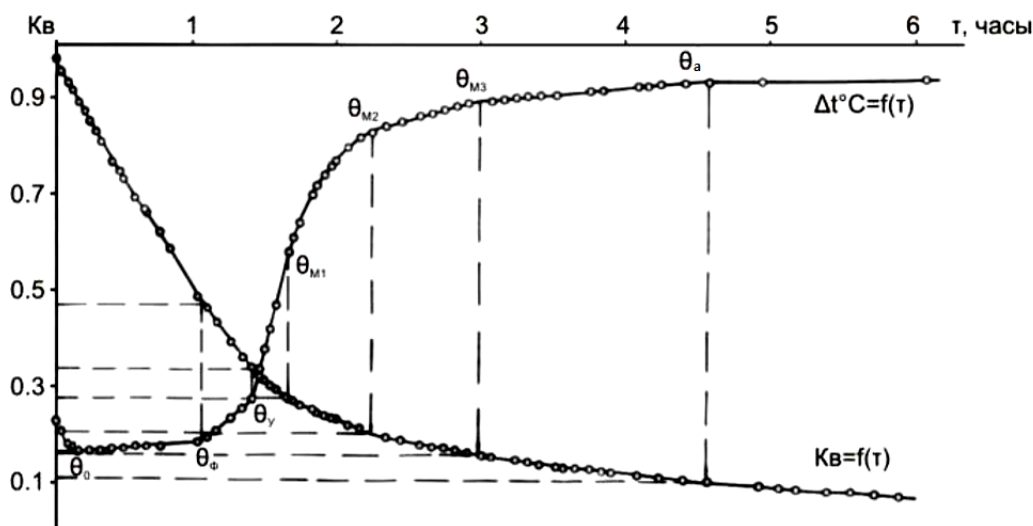


Рис. 2. Пример массометрической и термометрической кривых сушки образца породы интервалы различного энергетического состояния воды: $Kв$ – водонасыщенность образца, τ – время

Отрезок от начала термограммы до точки θ_0 характеризует начальную стадию охлаждения образца, если температура его была больше температуры, соответствующей периоду постоянной скорости испарения. Эта стадия соответствует испарению влаги с поверхности образца и, как следствие, не несет информации о формах и видах связи влаги с породой внутри нее. Отрезок $\theta_0\theta_\phi$ отвечает испарению капиллярной влаги физико-механической формы связи, находящейся в порах образца радиусом $r > 10^{-5}$ см (в макрокапиллярах и макропорах).

Отрезок $\theta_\phi\theta_y$ на термограмме сушки отвечает периоду удаления из образца породы влаги фуникулярного (непрерывно-связанного, канатного) состояния. Линейный отрезок $\theta_y\theta_{M1}$ – период удаления влаги углов пор или стыковой влаги, характеризуется дальнейшим прогревом (увеличением температуры) образца. Отрезки $\theta_{M1}\theta_{M2}$, $\theta_{M2}\theta_{M3}$ и $\theta_{M3}\theta_a$ на термограмме сушки описывают период испарения из образца влаги микрокапилляров убывающих размеров ($r < 10^{-5}$ см) [17].

Усовершенствованная в 2010 г. в лаборатории трудноизвлекаемых запасов углеводородов в ИПНГ РАН (Н.А. Скибицкая, М.Н. Большаков, В.А. Кузьмин, О.О. Марутян) конструкция установки состоит из корпуса

(аэродинамическая труба), в котором с помощью фена (теплоэлектровентилятора) поток нагретого воздуха постоянной скорости (0,5 м/сек) и температуры (25 °С) обдувает влажный образец (рис. 3).

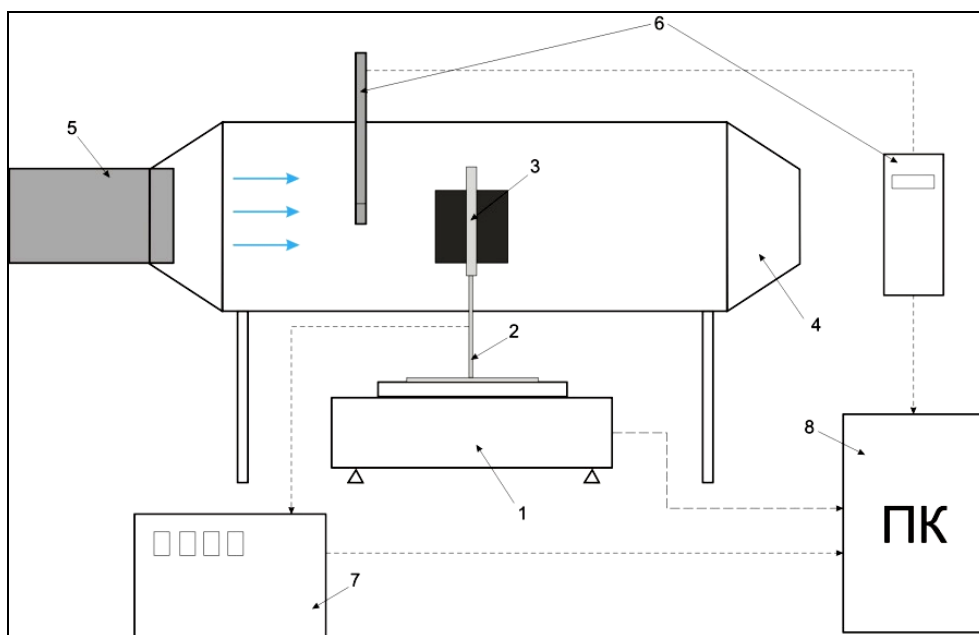


Рис. 3. Схема установки аспирационной термомассометрии: 1 – лабораторные весы (дискретность 0,001 г); 2 – держатель образца, позволяющий обеспечить свободный обдув всей поверхности образца; 3 – датчики температуры образца и температуры воздуха (дискретность 0,01 °С); 4 – аэродинамическая труба для стабилизации условий опыта, в которую помещается насыщенный образец; 5 – фен (теплоэлектровентилятор), обеспечивающий ускоренную сушку образца и удаление влаги из системы; 6 – термоанемометр для контроля скорости и температуры потока воздуха; 7 – измеритель температуры (АЦП); 8 – персональный компьютер с программным обеспечением (для регистрации данных в реальном времени)

Держатель с образцом при этом стоит на весах, расположенных под корпусом, для чего в корпусе имеется отверстие. Весы позволяют фиксировать изменение веса в процессе сушки. В установке имеются платиновые тонкопленочные датчики измерения температуры поверхности образца и измерения температуры потока нагретого феном воздуха. Данные веса, скорости потока, температуры образца и воздуха с помощью специального программного обеспечения

для регистрации массометрии и термограммы сушки водонасыщенного образца [19, 20] собираются на персональном компьютере.

Регистрация веса образца в установке производится каждые 2,5–5 минут. Применяется «мягкий» режим сушки, то есть температура воздуха 25 °С и скорость воздуха 0,5 м/сек. Конечная равновесная влажность образца в процессе сушки определяется влажностью в помещении, в котором проводится эксперимент.

Анализ работы установки и результатов термомассометрических исследований показали, что установка имеет потенциал для ее дальнейшей модернизации, связанный с возможностью повышения точности определения температуры высушиваемого образца.

Измерение температуры образца в установке производится датчиками температуры в определенных местах. Однако, на поверхности цилиндрического (кубического) образца имеется значительный температурный градиент из-за его неоднородной сушки в однонаправленном потоке нагретого воздуха, что может искажать кривые сушки образцов. Это связано с тем, что разные стороны образца по-разному обдуваются потоком воздуха, а капиллярный переток жидкости по тонким порам не обеспечивает равномерного насыщения образца во время сушки. Поэтому испарение на передней к потоку воздуха стороне образца более интенсивное, чем на

обратной к потоку стороне. Это приводит, во-первых, к различию температуры на поверхности образца и, во-вторых, к изменению динамики процесса сушки в зависимости от размеров пор в образце.

Для повышения точности определения форм и видов воды для образцов со сложной поровой структурой в установке предполагается реализовать дополнительный функционал – вращение образца, а также дистанционное измерение температуры образца [21]. Для этого образец располагается на вращающемся держателе. Вариант модифицированной установки представлен на рис. 4 (общий вид). Она, как и в прежнем варианте, содержит аэродинамическую трубу-корпус, тепловентилятор, направляющий поток воздуха постоянной скорости и температуры на образец, лабораторные электронные весы и персональный компьютер с программным обеспечением для регистрации и обработки данных в реальном времени.

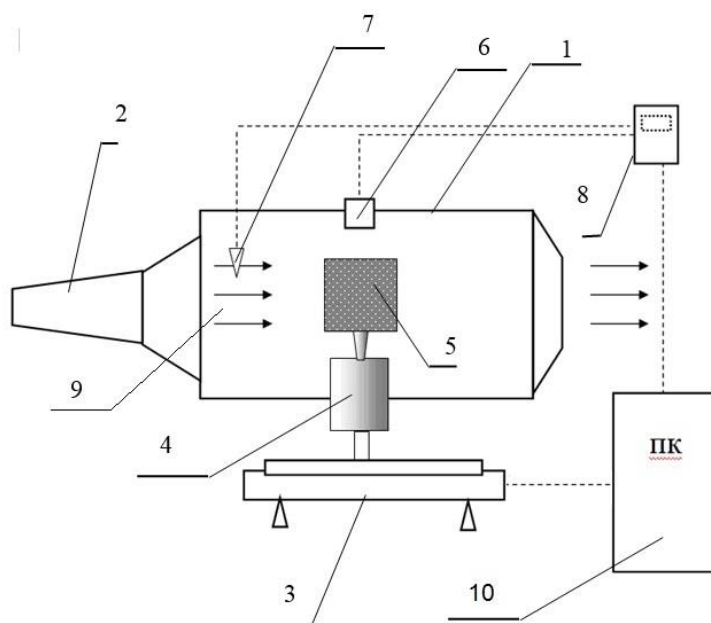


Рис. 4. Модифицированная установка АТММ: 1 – аэродинамическая труба; 2 – тепловентилятор; 3 – лабораторные электронные весы; 4 – шаговый электродвигатель; 5 – образец; 6 – инфракрасный датчик температуры образца; 7 – датчик температуры воздуха; 8 – измеритель температуры; 9 – поток воздуха; 10 – персональный компьютер

При этом держатель образца расположен на валу шагового электродвигателя для вращения образца, а инфракрасный датчик температуры позволяет измерять температуру образца на расстоянии, что дает возможность свободного вращения, а также снижает погрешность измерения веса за счет отсутствия проводных соединений.

Мягкое вращение образца позволяет привести в равные условия термосушки разные стороны образца и уменьшить эффект капиллярного перетока воды от передней, более обезвоженной части образца, на которую непосредственно воздействует поток нагретого воздуха, к менее обезвоженной противоположной части образца. Это особенно важно для тонкопористых образцов, в которых капиллярный перенос воды (жидкости) замедлен.

Такой образец рассмотрен в качестве примера интерпретации на рис. 5. На экспериментальной кривой связи водонасыщенности образца с разницей температур воздуха и образца можно достаточно уверенно выделить 4 участка. В точке 2 разделяются зоны фуникулярной воды и воды углов пор – это значение близко величине $K_{во}$, полученной центрифугированием ($K_{во} = 70\%$). В точке 1 при $K_v = 45\%$ разделяются зоны воды углов пор и воды микрокапилляров. Значение точки 3 близко величине $K_{го}$ (коэффициент остаточного газонефтенасыщения), полученной способом прямоточной капиллярной пропитки, т. е. соответствует границе фуникулярной и структурно-связанной воды. Следовательно, показания термомассометрии подтверждаются данными центрифугирования и прямоточной капиллярной пропитки в доступном для этих методов диапазоне.

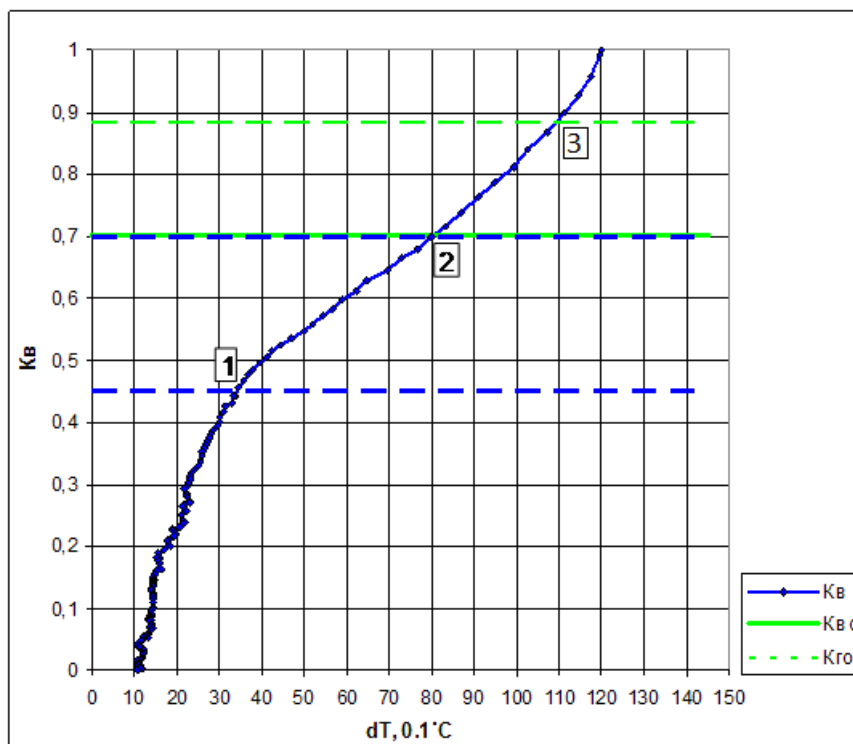


Рис. 5. Обр. 4/13. Экспериментальная связь водонасыщенности образца K_v с разницей температур воздуха и образца dT (скв. № 210, инт. отбора 3740–3748,1 м, C_{1S1} , ВГКМ, $K_{по} = 5,97\%$; $K_{го} = 11,59\%$; $K_{во} = 70,15\%$)

Предложенный способ дальнейшей модернизации установки аспирационной термомассометрии позволяет повысить точность измерений за счет более

равномерного испарения влаги пористого образца породы и измерения температуры бесконтактным инфракрасным датчиком в процессе сушки.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема: «Прогноз состояния ресурсной базы нефтегазового комплекса России на основе системных исследований перспектив нефтегазоносности природных резервуаров в карбонатных, терригенных и сланцевых формациях», № АААА-А19-119030690047-6).

Литература

1. Амикс Дж., Басс Д., Уайтинг Р. Физика нефтяного пласта. М.: Гостоптехиздат, 1962. 569 с.
2. Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды. М.; Л.: Сельхозгиз, 1930. 278 с.
3. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Овчаренко Ф.Д. и др. Вода в дисперсных системах. М.: Химия, 1989. 288 с.
4. Сергеев Е.М. Связанная вода в грунтах и ее влияние на их дисперсность и микроструктуру // Учен. зап. МГУ. Геология. 1956. Вып. 176. С. 221–231.
5. Злочевская Р.И., Королев В.А. Электроповерхностные явления в глинистых породах. М.: Изд-во МГУ, 1988. 177 с.
6. Ханин А.А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. М.: Недра, 1969. 368 с.
7. Поверхностные пленки воды в дисперсных структурах / Под ред. Е.Д. Щукина. М.: Изд-во МГУ, 1988. 279 с.
8. Злочевская Р.И., Зиангиров Р.С., Сергеев Е.М., Рыбачук А.Н. Исследование свойств связанной воды и двойного электрического слоя системы «глины–раствор» // Связанная вода в дисперсных системах: Сб. ст. 1970. Вып. 1. С. 102–138.
9. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
10. Багаутдинов А.К. Некоторые особенности положения водонефтяного контакта залежей Советского месторождения // Вопросы нефтепромысловой геологии и проектирования разработки нефтяных месторождений Западной Сибири: Тр. Гипротюменнефтегаза, Тюмень, 1971. Вып. 19. С. 85–97.
11. Messer E.S. Interstitial water determination by an evaporation method // Trans. AIME, Petrol. Devel. and Technol. 1951. Vol. 192. P. 269–274.
12. Танкаева Л.К. Исследование метода определения остаточной водонасыщенности газонефтедержащих пород по кривым изотермической сушки образцов керна // Обз. инф. ВНИИОЭНГ. Сер. Геология и разведка газовых и газоконденсатных месторождений. М. 1969. Вып. 4. 40 с.
13. Шишигин С.П. Определение остаточной водонасыщенности методом капиллярного впитывания (вытяжки) // Геология нефти и газа. 1964. № 10. С. 41–43.
14. Долгов С.И. Исследование подвижности почвенной влаги и ее доступности для растений / Отв. ред. Л.И. Прасолов. М.; Л.: Изд-во АН СССР. 1948. 210 с.

15. *Шишигин С.П., Конюхов В.И.* Определение количества связанной воды в образцах пород коллекторов методом электропроводности // Геология и геофизика. 1964. № 7. С. 90–95.
16. *Казанский М.Ф.* Термограммы сушки капиллярно-пористых тел с разнородно-связанной влагой // Тепло- и массообмен в капиллярно-пористых телах: Сб. ст. М.: Госэнергоиздат, 1957. Вып. 8. С. 180–191.
17. *Скибицкая Н.А., Морозович Я.Р.* А.с. SU 320607 A1. Способ определения насыщенности горных пород флюидом, например водой. № 1427329; Заявл. 24.04.1970; Оpubл. 04.11.1971 // Изобретения. Полез. модели. Бюл. № 34. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>
18. *Скибицкая Н.А., Морозович Я.Р.* А.с. SU 467997 A1. Дифференциальный датчик температуры для термомассометрической аспирационной установки. № 1426158; Заявл. 24.04.1970; Оpubл. 25.04.1975 // Изобретения. Полез. модели. Бюл. № 15. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>
19. *Марутян О.О., Большаков М.Н.* Лабораторная установка аспирационной термомассометрии для определения водонасыщенности // IV Ежегодная Конференция молодых специалистов ИПНГ РАН: Тез. докл. М.: ИПНГ РАН, 2014. http://www.ipng.ru/uf/Theses_03122014_BolshakovMN_MarutianOO.pdf (Дата обращения 14.09.2020).
20. *Самохвалов Н.И., Большаков М.Н., Марутян О.О., Халиуллина А.Ф.* Виды и формы связи жидких углеводородов в нефтенасыщенных породах по данным аспирационной термомассометрии // Актуальные проблемы нефти и газа. 2017. Вып. 3(18). С. 7. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2017-18.art7>
21. *Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А.* Патент RU 2680418 C1. Лабораторная установка аспирационной термомассометрии. № 2018107675; Заявл. 02.03.2018; Оpubл. 21.02.2019 // Изобретения. Полез. модели. Бюл. № 6. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>

Improvement of aspiration thermal massometry method for determination of forms and types of water binding in rocks

N.A. Skibitskaya, V.A. Kuzmin, M.N. Bolshakov*, O.O. Marutyan, E.G. Domanova

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: *rgu2006@mail.ru

Abstract. The existing laboratory unit of aspiration thermal massometry, based on the measurement of weight and temperature during drying of rock sample in the air flow, meets the petrophysical tasks of studying oil and gas reservoirs. At the same time, it has the potential to improve the research accuracy. The paper proposes a modernized facility for studying properties of water-saturated and hydrocarbon-saturated rocks, which due to its design increases measurement accuracy.

Keywords: aspiration thermal massometry, isothermal drying, curves of drying, bound water, residual water, pore corner water, microcapillary water, structurally bound water, funicular water, pores, reservoirs.

Citation: Skibitskaya N.A., Kuzmin V.A., Bolshakov M.N., Marutyan O.O., Domanova E.G. Improvement of aspiration thermal massometry method for determination of forms and types of water binding in rocks // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 39–50. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art3> (In Russ.).

References

1. Amix J., Bass D., Witing R. Physics of oil reservoirs. Moscow: Gostoptekhizdat, 1962. 569 p. (In Russ.).
2. Lebedev A.F. Soil and ground water. Moscow; Leningrad: Selkhozgiz, 1930. 278 p. (In Russ.).
3. Deryagin B.V., Churaev N.V., Ovcharenko F.D. et al. Water in dispersed systems. Moscow: Khimiya, 1989. 288 p. (In Russ.).
4. Sergeev E.M. Bound water in soils and its effect on their dispersion and microstructure // Scientific Notes of Moscow State University. Geology. 1956. Iss. 176. P. 221–231. (In Russ.).
5. Zlochevskaya R.I., Korolev V.A. Electrosurface phenomena in clay rocks. Moscow: Moscow State University, 1988. 177 p. (In Russ.).
6. Khanin A.A. Oil and gas reservoir rocks and their study. Moscow: Nedra, 1969. 368 p. (In Russ.).
7. Surface films of water in dispersed structures / Ed. by E.D. Shchukin. Moscow: Moscow State University, 1988. 279 p. (In Russ.).
8. Zlochevskaya R.I., Ziangirov R.S., Sergeev E.M., Rybachuk A.N. Investigation of the properties of bound water and a double electric layer of the clay–solution system // Bound water in dispersed systems: Collected papers. 1970. Iss. 1. P. 102–138. (In Russ.).
9. Lykov A.V. Drying theory. Moscow: Energy, 1968. 472 p. (In Russ.).
10. Bagautdinov A.K. Some features of the position of the oil-water contact of the Sovetskoye field // Issues of oilfield geology and design of development of oil fields in Western Siberia: Proceedings of Giprotymenneftegaz. Tumen, 1971. Iss. 19. P. 85–97. (In Russ.).

11. *Messer E.S.* Interstitial water determination by an evaporation method // Trans. AIME, Petrol. Devel. and Technol. 1951. Vol. 192. P. 269–274.
12. *Tankaeva L.K.* Investigation of the method for determining the residual water saturation of gas-oil-bearing rocks from the curves of isothermal drying of core samples // VNIIOENG Review Info. Ser. Geology and Exploration of Gas and Gas Condensate Fields. 1969. No. 4. 40 p. (In Russ.).
13. *Shishigin S.P.* Determination of residual water saturation by capillary absorption (extraction) // Geologiya Nefti i Gaza. 1964. No. 10. P. 41–43. (In Russ.).
14. *Dolgov S.I.* Study of the mobility of soil moisture and its availability for plants / Ed. by L.I. Prasolov. Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences. 1948. 210 p. (In Russ.).
15. *Shishigin S.P., Konyukhov V.I.* Determination of the amount of bound water in reservoir rock samples by the electrical conductivity method // Russian Geology and Geophysics. 1964. No. 7. P. 90–95. (In Russ.).
16. *Kazansky M.F.* Thermograms of drying of capillary-porous bodies with heterogeneously bound moisture // Heat and mass transfer in capillary-porous bodies: Collected papers. Moscow: Gosenergoizdat. 1957. Iss. 8. P. 180–191. (In Russ.).
17. *Skibitskaya N.A., Morozovich Ya.R.* A.C. SU 320607 A1. A method for determining the saturation of rocks with a fluid, such as water. No. 1427329; Declared 24.04.1970; Publ. 04.11.1971 // Inventions. Useful models. Bull. No. 34. – Available at: <http://www1.fips.ru> (In Russ.).
18. *Skibitskaya N.A., Morozovich Ya.R.* A.C. SU 467997 A1. Differential temperature sensor for aspiration thermal massometry equipment. No. 1426158; Declared 24.04.1970; Publ. 25.04.1975 // Inventions. Useful models. Bull. No. 15. – Available at: <http://www1.fips.ru> (In Russ.).
19. *Marutyan O.O., Bolshakov M.N.* Laboratory equipment for aspiration thermal massometry for determining water saturation // The 4th Annual OGRI RAS Young Professionals Conference: Abstracts. Moscow: Oil and Gas Research Institute of the RAS, 2014. http://www.ipng.ru/uf/Theses_03122014_BolshakovMN_MarutianOO.pdf (Accessed on 14.09.2020). (In Russ.).
20. *Samokhvalov N.I., Bolshakov M.N., Marutyan O.O., Khaliullina A.F.* Types and forms of liquid hydrocarbon binding in oil-saturated rocks according to aspiration thermal massometry // Actual Problems of Oil and Gas. 2017. Iss. 3(18). P. 7. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2017-18.art7> (In Russ.).
21. *Skibitskaya N.A., Kuzmin V.A.* Pat. RU 2680418 C1. Laboratory installation of the aspiration thermomassometry. No. 2018107675; Declared 02.03.2018; Publ. 21.02.2019 // Inventions. Useful models. Bull. No. 6. – Available at: <http://www1.fips.ru>

Оценка работоспособности атмосферно-электрического механизма лозоходства

В.Н. Шулейкин^{1*}, Г.В. Куповых^{2**}

1 – Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

2 – Южный федеральный университет, г. Таганрог

E-mail: *shvn1947@yandex.ru, **kupovykh@sfedu.ru

Аннотация. Движение рамки в руке оператора провоцируется расталкиванием избыточного отрицательного заряда воздуха и отрицательного заряда рамки, равного по плотности заряду Земли. Мощное увеличение сил расталкивания достигается за счет эффекта рычага и оценивается отношением расстояния точки на горизонтальном колене к радиусу вертикального колена. Дальнейшее усиление достигается увеличением радиуса горизонтального колена рамки.

Ключевые слова: рамка, отрицательный заряд воздуха, отрицательный заряд рамки, силы расталкивания, рычаг, радиус вертикального колена.

Для цитирования: Шулейкин В.Н., Куповых Г.В. Оценка работоспособности атмосферно-электрического механизма лозоходства // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 51–63. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art4>

Дайте мне точку опоры, и я переверну Землю.
Архимед

Введение

По материалам многочисленных публикаций, лозоходство – «dowsing» (по принятой терминологии в нашей стране – «биолокация») уже в течение 4–7 тысячелетий используется для поисков воды, рудных месторождений, скоплений углеводородов, областей разуплотнения земной коры. Профильные наблюдения атмосферного электрического поля (АЭП) и полярных проводимостей (ПП) воздуха показывают, что все неоднородности, выделяемые лозоходцами, поддаются инструментальной регистрации с использованием указанных характеристик приземного атмосферного электричества [1].

Над зонами близкого подхода к поверхности Земли грунтовых вод и верховодки наблюдается провал АЭП и рост

ПП; провал поля присущ рудным и нефтяным месторождениям, областям естественного и искусственного разуплотнения земной коры. Все выделенные объекты характеризуются повышенной ионизацией приземного воздуха, присутствием над Землей избыточного отрицательного заряда – областью реверсивного электродного эффекта [1, 2]. Рамка-лоза в руке оператора, в свою очередь, несет на себе отрицательный заряд, равный по плотности отрицательному заряду Земли [3]. Все это позволяет предположить, что именно внесение отрицательно заряженной рамки в область реверсивного электродного эффекта – область избыточной концентрации отрицательного объемного заряда в приземном воздухе, приведет к движению измерительного инструмента.

Реверсивный электродный эффект

Возникновение над Землей области реверсивного электродного эффекта было обнаружено в ходе полевых наблюдений. Впервые исследователи обратили внимание на смену знака АЭП в преддверье сейсмических событий. В конце XIX века в ходе годовых режимных наблюдений в Императорской метеорологической обсерватории в Токио были зарегистрированы аномальные изменения поля, в том числе и со сменой знака [4].

В 1949 г. – перед Душанбинским и Оби-Гармским землетрясениями [5] неоднократно регистрировались отрицательные значения поля. За 5 часов до Ташкентского землетрясения 26 апреля

1960 г. с магнитудой $M = 5,3$ в эпицентральной зоне было зафиксировано изменение направления вектора АЭП [6].

На момент регистрации отрицательные значения поля не находили своего понятного физического объяснения, которое было получено в середине XX века при разработке теории электродного эффекта – перераспределения объемного заряда воздуха у отрицательно заряженной поверхности Земли [7–11]. Задачу удалось решить только для модельного случая наличия в атмосфере исключительно легких положительных n_1 и отрицательных n_2 ионов. В решении сразу проявилась разница в вариациях АЭП – E при реверсивном и классическом электродных эффектах (рис. 1).

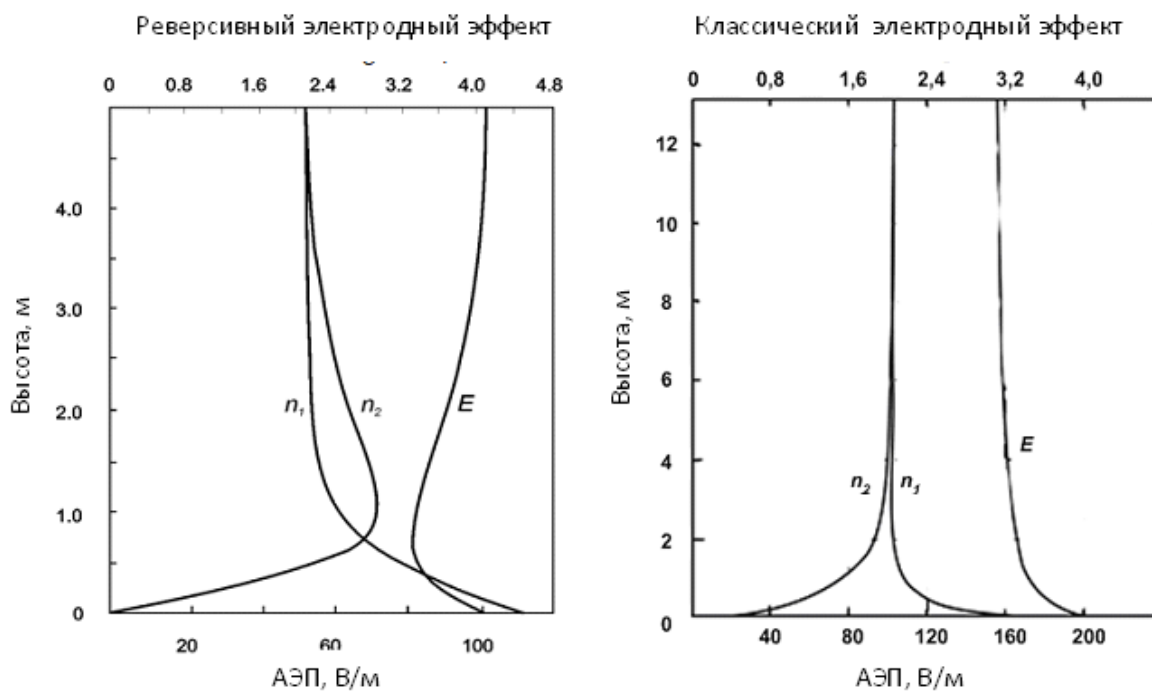


Рис. 1. Реверсивный и классический электродный эффект для случая присутствия в приземном воздухе только легких ионов

При скорости ионизации до 7–9 циклов в $\text{см}^3/\text{с}$, малой концентрации эксхалирующего почвенного радона, с ростом высоты относительно поверхности Земли имеет место плавный спад поля с

последующим выходом на фоновый уровень – классический электродный эффект. При большой концентрации ионизатора идет спад поля до уровня ниже фонового, перегиб и выход на фоновый уровень.

Причина спада АЭП ниже фонового уровня – образование слоя отрицательного объемного заряда над отрицательно заряженной поверхностью Земли. Установлено, что возможными причинами появления отрицательного объемного заряда в приземном слое являются повышенная ионизация в тонком слое вблизи поверхности Земли в случае слабого турбулентного перемешивания или слабые электрические поля. При этом усиление турбулентного перемешивания или электрического поля разрушает отрицательный объемный заряд.

Поскольку объемный заряд приземного воздуха определяется тяжелыми ионами,

исследуем механизм его генерации в турбулентном приземном слое, содержащем аэрозольные частицы. В случае слабого турбулентного перемешивания (скорость приземного ветра не более 2 м/с) при $E_0 = -100$ В/м, скорости ионизации 80 циклов в см³/с и концентрациях аэрозольных частиц $N = 10^8$ м⁻³ отрицательный объемный заряд и, как следствие, реверс электродного эффекта появляются на высоте более 2 м для легких ионов и 6,5 м для тяжелых ионов, соответственно. При этом у поверхности Земли объемный заряд остается положительным (рис. 2) [2].

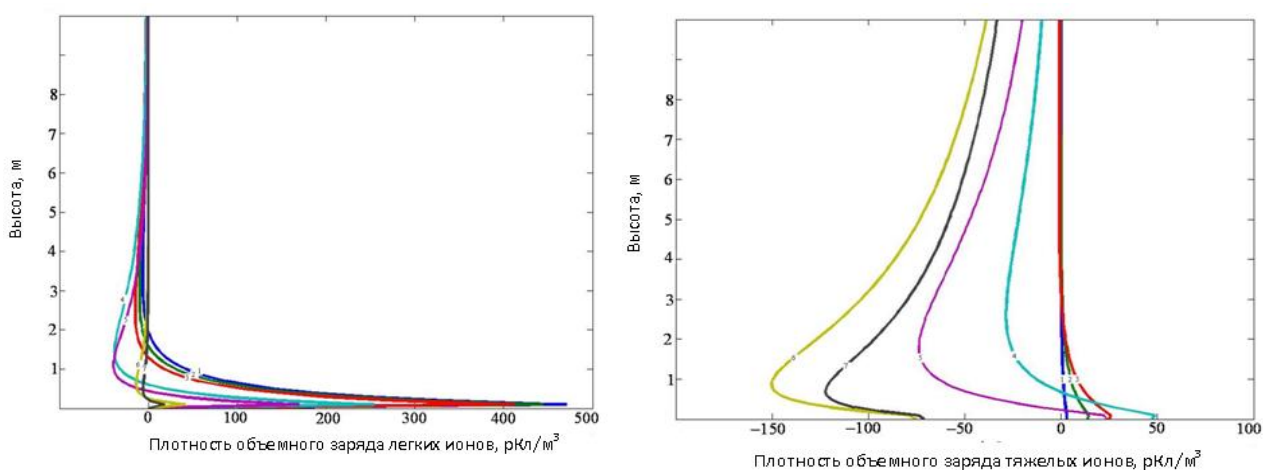


Рис. 2. Плотность объемного заряда приземного воздуха, создаваемого легкими и тяжелыми ионами; кривые 1–7: 1 – $N_1 \sim 10^8$ м⁻³, 2 – $N_2 \sim 5 \cdot 10^8$ м⁻³, 3 – $N_3 \sim 10^9$ м⁻³, 4 – $N_4 \sim 5 \cdot 10^9$ м⁻³, 5 – $N_5 \sim 10^{10}$ м⁻³, 6 – $N_6 \sim 5 \cdot 10^{10}$ м⁻³, 7 – $N_7 \sim 10^{11}$ м⁻³ [2]

Увеличение концентрации аэрозольных частиц до $N = 10^{10}$ м⁻³ приводит к увеличению отрицательного объемного заряда у поверхности Земли, к его обнаружению на более низких высотах. При концентрации аэрозольных частиц $N = 10^9$ м⁻³ отрицательный объемный заряд наблюдается на высоте более 1,4 м для легких ионов и 3,5 м для тяжелых ионов, соответственно, а при $N = 10^{10}$ м⁻³ – более 0,5 м для легких

ионов и 0,3 м и выше для тяжелых ионов, соответственно. Поскольку измерительный инструмент – рамка в руке оператора находится где-то на высоте ~ 1 м, положим при дальнейших оценках плотность отрицательного объемного заряда $N = 10^{10}$ м⁻³. Более того, при подобном аэрозольном загрязнении отрицательный объемный заряд будет наблюдаться даже при сильном турбулентном перемешивании.

Многочисленные результаты полевых наблюдений иллюстрируют работу описанного механизма. При фоновом значении поля над вмещающими породами Новоселковского рудопоявления (Белоруссия), равном 308 ± 37 В/м, спад АЭП над рудным телом составлял ~ 100 В/м; над проекцией пласта-коллектора Щелковского ПХГ в последние дни закачки в 1999 г. среднее поле вне проекции объема закачки – 557 В/м, над объемом закачки – 384 В/м; в 2000 г. – 559 В/м и 368 В/м,

соответственно [1]. При многочисленных совместных профильных наблюдениях АЭП и лозоходцев над зоной близкого подхода к поверхности Земли грунтовых вод у г. Чехова провал поля варьировал в пределах 40–60% от фонового уровня, угол поворота рамок лежал на уровне $\sim 50^\circ$. На рис. 3 представлен провал АЭП над зоной близкого подхода к поверхности Земли грунтовых вод; в минимуме поля рамка в руках оператора поворачивалась на величину $\sim 60^\circ$ [12].

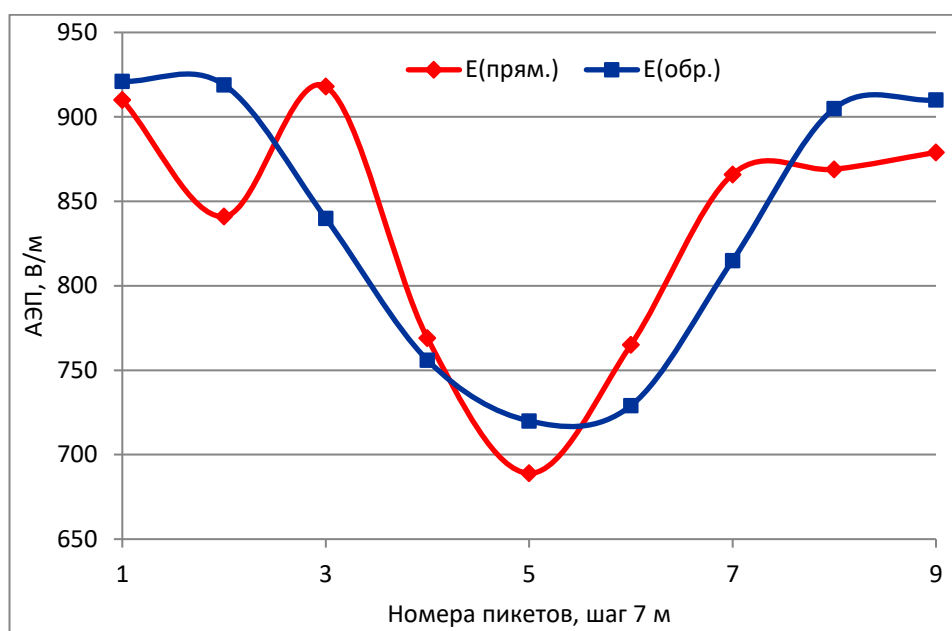


Рис. 3. Реверсивный электродный эффект над зоной близкого подхода к поверхности Земли грунтовых вод [12]

В работах 1999 г. на Щелковском ПХГ в последние дни закачки на одном из профилей на территории куста нагнетательных скважин были зарегистрированы отрицательные значения поля. В сентябре 2009 г. у 19 нагнетательных скважин 4-й очереди Касимовского ПХГ на следующий день после завершения цикла закачки рамка в руках оператора не только поворачивалась, но и вращалась.

Проведенный анализ и результаты полевых наблюдений убеждают, что рост

ионизации приземного воздуха над объектами, выделяемыми лозоходцами, изменит распределение объемного заряда приземного воздуха – произойдет переход от классического к реверсивному электродному эффекту.

В изменениях АЭП этот переход проявится в спаде поля на первые десятки процентов относительно фонового уровня в области классического электродного эффекта.

Силы расталкивания и рекомендации по повышению чувствительности рамки

Для оценки сил расталкивания отрицательного объемного заряда воздуха и отрицательного заряда рамки обратимся к закону Кулона. Для его корректного применения заряды отдельных участков поверхности горизонтального колена рамки и обволакивающих объемов воздуха будем рассматривать как точечные. Принимая во внимание то, что поворот рамки происходит в зоне реверсивного электродного эффекта – зоне избыточной эксхалации радона, и с учетом выделенного высотного диапазона (выше 0,3–0,5 м) возьмем плотность отрицательного объемного заряда $\sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$ [2].

В работе [13] проведена оценка силы тяжести, стремящейся вернуть рамку в исходное положение после ее поворота на 30° в плоскости, лежащей под углом 8° к горизонту. Расчеты выполнены для рамки с длиной горизонтального колена $L = 0,4 \text{ м}$ и диаметром $d = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Сила тяжести, стремящаяся возвратить рамку в исходное положение, $F_{\text{тр}}(\text{Fe}) = 380 \text{ дин} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$

для железной и $F_{\text{тр}}(\text{Al}) = 130 \text{ дин} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ для алюминиевой рамок. В расчетах не принимается во внимание сила трения, препятствующая вращению вертикального колена рамки в руке оператора. Допустим, что эта сила составляет 3% от возвращающей силы тяжести: $F_{\text{тр}}(\text{Fe}) = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$ и $F_{\text{тр}}(\text{Al}) = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$. Для наглядности дальнейших оценок будем считать, что горизонтальное колено рамки движется в горизонтальной плоскости, т. е. повороту рамки будет препятствовать только сила трения (в оценках будем использовать указанные выше размеры рамки в работе [13]).

Разобьем горизонтальное колено рамки на 40 равных частей–долей и рассмотрим в первом приближении геометрию шлейфа за каждой выделенной долей в движении. Эксперимент с лазерной указкой, закрепленной на горизонтальном колене рамки, показал, что измерительный инструмент неизбежно колеблется в руке оператора (круглое вертикальное колено – не рукоятка револьвера!). Амплитуда колебаний составляет величину порядка $8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ на мишени, установленной на расстоянии 6 м; угол колебаний $\sim 0,013 \text{ рад}$ (рис. 4).

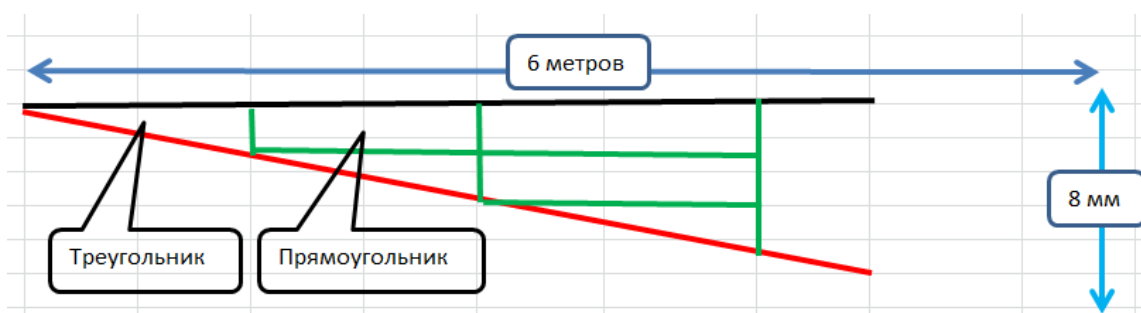


Рис. 4. Схема конфигурации объемов шлейфа, освобождающихся при уходе 1/40 долей горизонтального колена рамки из исходного положения

Для первой 1/40 доли рамки при движении освобождается объем треугольного сечения с толщиной, равной диаметру рамки; для второй доли – к объему треугольного сечения добавится объем прямоугольного сечения; для третьей

доли – два объема прямоугольного сечения и т. д. Длина катета треугольника и короткая сторона прямоугольника будут равны произведению 1/40 доли длины рамки (10^{-2} м) на синус угла поворота.

После поворота рамки в освободившийся объем шлейфа затягивается отрицательный объемный заряд воздуха: $q(\text{тр}) = (-1,6\text{E}-18)$ Кл, $q(\text{пр}) = (-3,2\text{E}-18)$ Кл для треугольного и прямоугольного сечений, соответственно. Рамка, в свою очередь, несет на себе отрицательный заряд, равный по плотности отрицательному заряду Земли ($-3,43 \cdot 10^{-4}$) ед. СГСЭ на см^2 [3]; заряд 1/40 доли рамки $q = (-1,62\text{E}-13)$ Кл.

Отметим характерную особенность работы сил расталкивания при движении рамки в горизонтальной плоскости. Относительно оси вращения (вертикального колена рамки в руке оператора) горизонтальное колено является рычагом, работающим против сил трения, удерживающим вертикальное колено рамки.

Примем за плечо рычага, на который работают силы расталкивания, расстояние от середины выделенной 1/40 доли рамки плюс радиус вертикального колена; за плечо рычага, препятствующего повороту, – половину радиуса вертикального колена рамки. Увеличение силы расталкивания будет пропорционально отношению этих плеч. Для первой 1/40 доли рамки оно составит величину $s_1 = 5,375 \cdot 10^{-3} \text{ м} / 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 14,3$; для второй 1/40 доли – величину $s_2 = 15,375 \cdot 10^{-3} \text{ м} / 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 41$ и т. д. При проведении оценок силы расталкивания точечных зарядов (заряд 1/40 доли рамки и заряд воздуха, затянутого в шлейф) возьмем три расстояния между ними: $F(10) - r_1 = 10^{-5} \text{ м}$, $F(5) - r_2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $F(1) - r_3 = 10^{-6} \text{ м}$. Результаты расчетов представлены на рис. 5.

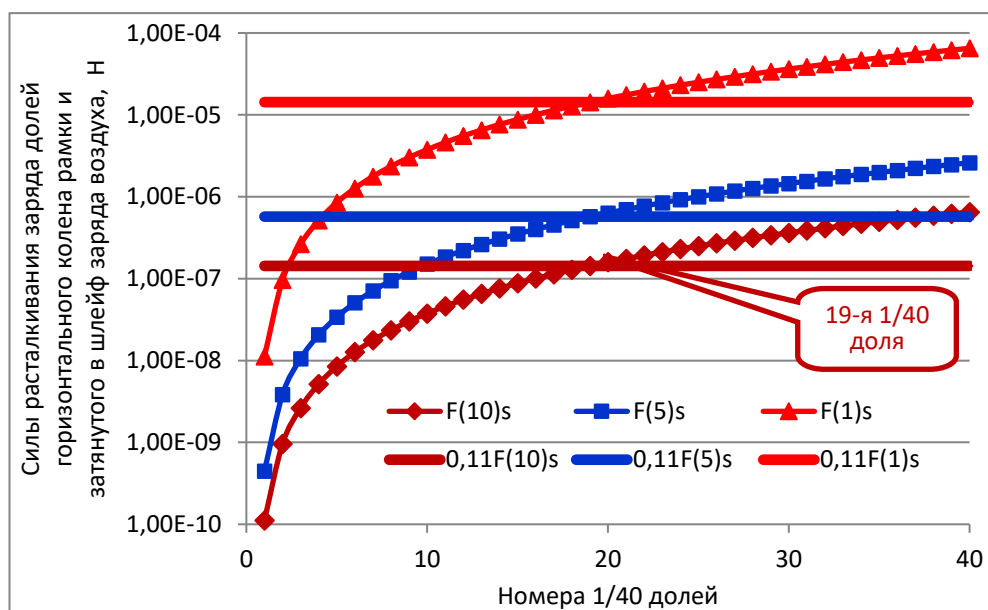


Рис. 5. Силы расталкивания 1/40 долей рамки диаметром 1,5 мм и зарядов воздуха, затянутого в шлейф, при отклонении горизонтального колена на 0,0133 рад

Графики (см. рис. 5) наглядно иллюстрируют эффект рычага – 89% сил расталкивания объемного заряда воздуха и рамки начинают работать с 20-й 1/40 доли горизонтального колена рамки. В табл. 1

представлены результаты расчетов суммарных сил для расстояния между точечными зарядами r_i , равного 10 мкм, 5 мкм и 1 мкм, при колебаниях рамки на 0,013 рад.

Таблица 1

**Силы расталкивания объемного заряда воздуха и горизонтального колена рамки
диаметром 1,5 мм**

Диаметр рамки	Угол поворота	Расстояние между зарядами	Плотность отрицательных зарядов	Сила расталкивания, Н	89% силы расталкивания, Н
$1,5 \cdot 10^{-3}$ м	0,0133 рад	10^{-5} м $5 \cdot 10^{-6}$ м 10^{-6} м	10000 эл. зар./см ³	8,81E-06 3,52E-05 8,81E-04	7,84E-06 3,14E-05 7,84E-04

Из проведенных оценок видно, что если горизонтальное колено рамки движется в горизонтальной плоскости, то даже при расстоянии $r_2 = 5$ мкм между точечными зарядами возникают заметные силы расталкивания, сравнимые с силой трения в руке оператора.

Анализ результатов выполненных оценок позволяет сделать ряд выводов:

– основное влияние на увеличение сил расталкивания оказывает эффект рычага. Для иллюстрации – если силы расталкивания первой доли рамки диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ м увеличиваются примерно в 14 раз, то для 40-й доли они увеличиваются уже примерно в 1050 раз;

– следующего по значимости роста сил расталкивания можно достичь увеличением диаметра рамки. Поскольку для рамки выбранных размеров на расталкивание работает часть рамки, начиная с 20-й доли, то и увеличение диаметра следует начать с 20-й доли; диаметр вертикального колена и первых 19 долей горизонтального колена остается прежним;

– для минимизации сил трения между вертикальным коленом и рукой оператора рамку следует делать максимально легкой – полый.

В расчете сил расталкивания (см. рис. 5) учитывался полный заряд горизонтального колена рамки. С физической

точки зрения на расталкивание работает только половина заряда, присутствующего на площади горизонтального колена рамки, на стороне, противоположной направлению движения.

Результаты расчетов сил расталкивания для рамки, отрицательный заряд горизонтального колена которой уменьшен в 2 раза, а внешний диаметр, начиная с 20-й доли, увеличен в 3 раза (до $4,5 \cdot 10^{-3}$ м), представлены на рис. 6.

На графике прямыми линиями представлены сила расталкивания 19-й доли горизонтального колена рамки. Как следовало ожидать, после троекратного увеличения диаметра рамки, начиная с 20-й доли, суммарные силы расталкивания первых 19 долей составляют всего 1%. В табл. 2 приведена оценка сил расталкивания для рамки диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ м и $4,5 \cdot 10^{-3}$ м и половинным зарядом горизонтального колена.

Силы расталкивания, представленные в последнем столбце табл. 2, указывают на их сравнимость с силой трения для алюминиевой рамки ($F_{тр}(Al) = 4 \cdot 10^{-4}$ Н) даже для расстояния $r_1 = 10^{-5}$ м между точечными зарядами; для случая с расстоянием $r_3 = 10^{-6}$ м заряд, затянутый в шлейф за вращающейся рамкой, можно снизить на 2 порядка.

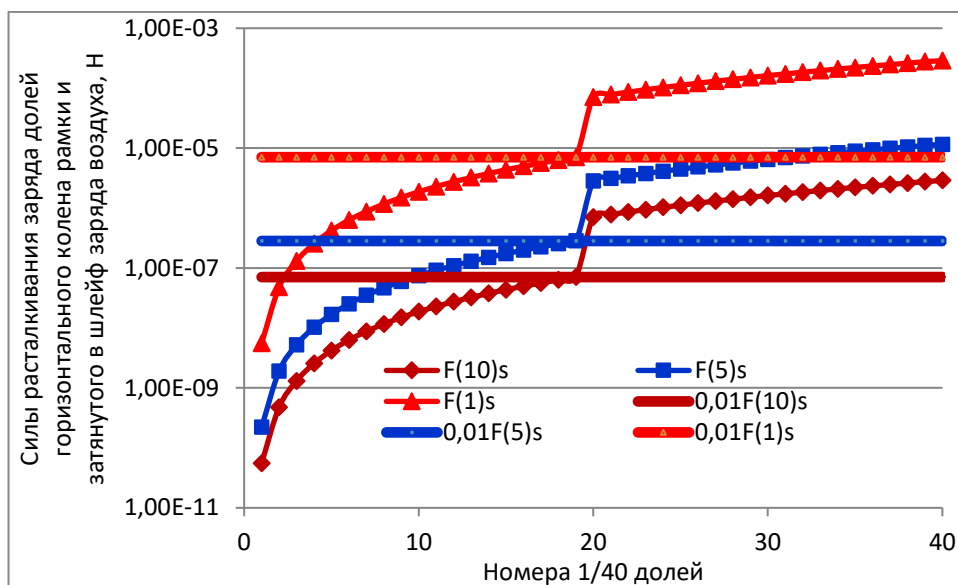


Рис. 6. Силы расталкивания для рамки, диаметр вертикального колена которой и первые 19 долей горизонтального – $1,5 \cdot 10^{-3}$ м; диаметр горизонтального колена, начиная с 20-й доли – $4,5 \cdot 10^{-3}$ м; отрицательный заряд горизонтального колена уменьшен в 2 раза; угол поворота 0,013 рад

Таблица 2

Силы расталкивания объемного заряда воздуха и горизонтального колена рамки диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ м и $4,5 \cdot 10^{-3}$ м при его половинном заряде

Диаметр рамки	Угол поворота	Расстояние между зарядами	Плотность отрицательных зарядов	Сила расталкивания, Н	99% силы расталкивания, Н
$1,5 \cdot 10^{-3}$ м до 19-й доли и $4,5 \cdot 10^{-3}$ м от 20-й доли	0,0133 рад	10^{-5} м $5 \cdot 10^{-6}$ м 10^{-6} м	10000 эл. зар./см ³	3,59E-05 1,44E-04 3,59E-03	3,54E-05 1,42E-04 3,54E-03

Полученные величины сил расталкивания позволяют предположить, что колебания рамки в руке оператора в пределах 0,013 рад могли спровоцировать ее дальнейшее движение.

Проведем следующую оценку сил расталкивания при повороте рамки на 10° . С учетом схемы расчетов (см. рис. 4), заряд, затянутый в шлейф, увеличится на отношение синусов углов поворота $\sin 10^\circ / 0,013$ рад, равное $\sim 13,1$ (рис. 7).

В отличие от случая отклонения рамки на 0,013 рад, почти 99% сил

расталкивания действуют на отрезок горизонтального колена рамки с 20-й до 40-й долей. Абсолютные значения сил представлены в табл. 3. Для превышения сил трения в руке оператора при расстоянии между точечными зарядами $r_3 = 10^{-6}$ м достаточно участие в расталкивании 0,01 отрицательного заряда воздуха, затянутого в шлейф задвигающимся горизонтальным коленом рамки; одновременно расстояние между точечными зарядами может быть увеличено приблизительно в 3 раза.

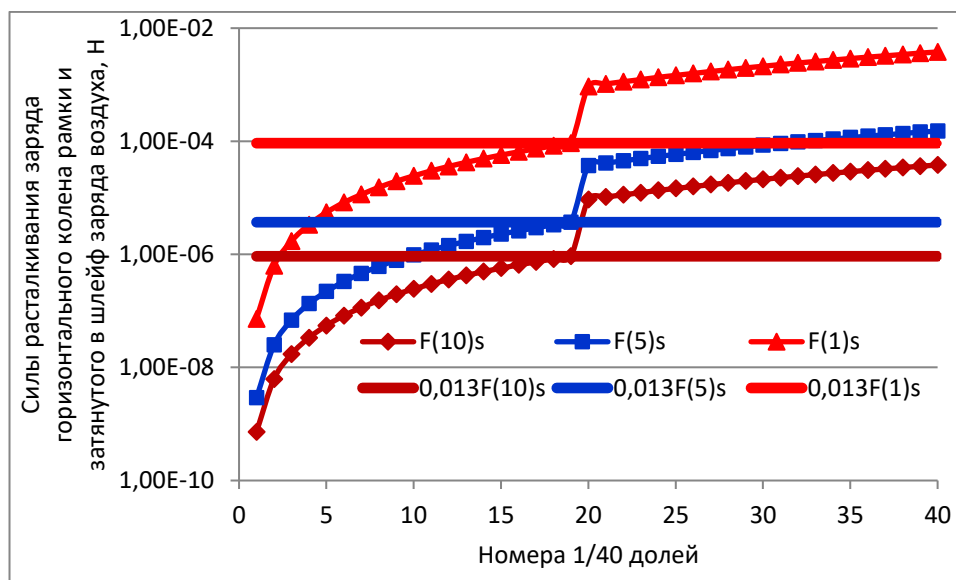


Рис. 7. Силы расталкивания для рамки, диаметр вертикального колена которой и первые 19 долей $1,5 \cdot 10^{-3}$ м; диаметр горизонтального колена, начиная с 20-й доли, $4,5 \cdot 10^{-3}$ м; отрицательный заряд горизонтального колена уменьшен в 2 раза; угол поворота 10°

Таблица 3

Силы расталкивания объемного заряда воздуха и горизонтального колена рамки диаметром 0,15 см и 0,45 см при его половинном заряде

Диаметр рамки	Угол поворота	Расстояние между зарядами	Плотность отрицательных зарядов	Сила расталкивания, Н	~ 99% силы расталкивания, Н
$1,5 \cdot 10^{-3}$ м до 19-й доли и $4,5 \cdot 10^{-3}$ м от 20-й доли	0,0133 рад	10^{-5} м $5 \cdot 10^{-6}$ м 10^{-6} м	10000 эл. зар./см ³	$4,70 \cdot 10^{-4}$ $1,88 \cdot 10^{-3}$ $4,70 \cdot 10^{-2}$	$4,64 \cdot 10^{-4}$ $1,86 \cdot 10^{-3}$ $4,64 \cdot 10^{-2}$

Для расстояния между точечными зарядами $r_2 = 5$ мкм зятянутый в шлейф заряд можно уменьшить примерно в 50 раз; для $r_1 = 10^{-5}$ м – в 10 раз.

Подводя итог анализу сил расталкивания отрицательного заряда рамки и отрицательного заряда воздуха, обволакивающего рамку, находящуюся в движении, остановимся на механизме поворота измерительного инструмента. По мере удаления от оси вращения увеличивается скорость движения – увеличивается зятягивание отрицательного

заряда воздуха в шлейф уходящей рамки (с уменьшением расстояния зятягиваемых отрицательных зарядов от поверхности рамки). Эффект будет дополнительно усиливаться с увеличением диаметра горизонтального колена рамки. Другими словами, принятое в расчетах трехкратное увеличение диаметра рамки, начиная с 20-й доли (см. рис. 6, 7), неизбежно приведет к увеличению сил расталкивания – уменьшению расстояния между точечными зарядами, которое входит в силы расталкивания в степени r^{-2} .

Заключение

Отрицательный заряд поверхности Земли неизбежно нарушает равномерное распределение объемного заряда приземного воздуха, порожденного повышенной ионизацией экскалирующим почвенным радоном. Над всеми объектами исследований лозоходцев в приземной атмосфере наблюдается реверсивный электродный эффект – избыточная ионизация воздуха, в результате которой образуется слой отрицательного объемного заряда. Именно этот слой отрицательного объемного заряда вокруг рамки, на которую через тело оператора натекает отрицательный заряд с Земли, является побуждающей причиной ее движения. Движение, в свою очередь, провоцируется неизбежными колебаниями горизонтального колена рамки длиной в десятки сантиметров, которым противодействует сила трения между вертикальным коленом, диаметром в единицы миллиметров, и рукой оператора. При этих колебаниях происходит затягивание обволакивающего отрицательного заряда воздуха в шлейф, образованный уходом горизонтального колена рамки.

Если колебания рамки происходят исключительно в горизонтальной плоскости, противодействие силам расталкивания будет оказывать только сила трения между вертикальным коленом и рукой оператора. Здесь к чисто электрическим силам расталкивания добавятся силы механические – эффект рычага. Усиление сил расталкивания будет определяться отношением плеч рычага, отношением расстояния от точки на горизонтальном колене к радиусу вертикального колена рамки. По самой грубой оценке, с удалением от оси вращения это усиление будет достигать сотен раз.

Эксперимент с рамкой, на конце которой была закреплена лазерная указка, показал, что колебания горизонтального колена в среднем составляют $\sim 0,013$ рад. Уже при столь малых колебаниях рамки возникают силы расталкивания, сравнимые с силой трения вертикального колена в руке оператора. Очевидно, что основное влияние на увеличение сил расталкивания оказывает эффект рычага, приводящий к увеличению сил в сотни раз; следующего по значимости роста сил расталкивания можно достичь увеличением диаметра рамки начиная с 20-й доли (диаметр вертикального колена и первых 19 долей горизонтального колена оставлен прежним); для минимизации сил трения между вертикальным коленом и рукой оператора рамку следует делать максимально легкой – полый.

Для рамки диаметр вертикального и первых 19 долей горизонтального колен составляет $1,5 \cdot 10^{-3}$ м, а начиная с 20-ой доли – $4,5 \cdot 10^{-3}$ м, при повороте на 10° и половинном заряде силы расталкивания F равны $\sim (4,70 \cdot 10^{-4} - 4,70 \cdot 10^{-2})$ Н. Это значит, что заряд, затянутый в шлейф уходящей рамки и участвующий в расталкивании, может быть снижен на порядки.

Увеличение диаметра второй половины рамки, где скорость движения растет с увеличением расстояния от оси вращения, дополнительно будет способствовать затягиванию отрицательного заряда воздуха в шлейф за двигающейся рамкой, что, в свою очередь, увеличит силы расталкивания. Оценки, выполненные с учетом работы электрических и механических сил, подтверждают правомочность атмосферно-электрической гипотезы поворота рамки над геологической неоднородностью, создающей над собой зону реверсивного электродного эффекта.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности (фундаментальные, поисковые и прикладные исследования)», № АААА-А19-119013190038-2).

Литература

1. Шулейкин В.Н., Жукин Г.Г., Куповых Г.В. Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. СПб.: ЦОП РГГМУ, 2015. 206 с.
2. Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С. Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 820–828.
3. Тверской П.Н. Курс метеорологии. Л.: Гидрометиздат, 1951. 887 с.
4. Milne J. Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena // Trans. Seismol. Soc. Jap. 1890. Vol. 15. P. 135–164.
5. Чернявский Е.А. Атмосферно-электрические предвестники землетрясений // Метеорология и гидрология в Узбекистане: Сб. ст. Ташкент. Изд-во АН УзССР, 1955. С. 317–327.
6. Мавлянов Г.А. Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года. Ташкент: ФАН, 1971. 672 с.
7. Chalmers J.A. The theory of electrode effect – I. Method and simple example // J. Atm. Terr. Phys. 1966. Vol. 28. P. 565–572. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(66\)90070-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(66)90070-5)
8. Chalmers J.A. The theory of electrode effect – II. Inclusion of condensation nuclei // J. Atm. Terr. Phys. 1966. Vol. 28. P. 573–579. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(66\)90071-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(66)90071-7)
9. Chalmers J.A. The theory of electrode effect – III. Restriction of assumptions // J. Atm. Terr. Phys. 1966. Vol. 28. P. 1029–1033. [https://doi.org/10.1016/S0021-9169\(17\)30033-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9169(17)30033-8)
10. Chalmers J.A. The theory of electrode effect – IV. Variation of ionization with height // J. Atm. Terr. Phys. 1967. Vol. 29. P. 217–219. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(67\)90136-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(67)90136-5)
11. Crozier W.D. Atmospheric electrical profiles below three meters // J. Geophys. Res. 1965. Vol. 70, No. 20. P. 2785–2790. <https://doi.org/10.1029/JZ070i012p02785>
12. Жигалин А.Д., Шулейкин В.Н. Лозоходство, нанотехнологии и перспективы прикладной и фундаментальной геофизики // Геология и геофизика Юга России. 2016. № 2. С. 132–139. <https://doi.org/10.23671/vnc.2016.2.20813>
13. Кибиткин В.В. Измерение границ поля источника биолокационным методом // Биофизический метод. Современные исследования: Сб. ст. М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2008. С. 32–39.

Performance assessment of the atmospheric electric dowsing mechanism

V.N. Shuleikin^{1*}, G.V. Kupovykh^{2**}

1 – Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

2 – Southern Federal University, Taganrog

E-mail: *shvn1947@yandex.ru, **kupovykh@sfedu.ru

Abstract. The movement of the frame in the operator's hand is provoked by the repulsion of the excess negative charge of air and the negative charge of the frame, equal in density to the charge of the Earth. A powerful increase in the repulsive forces is achieved due to the lever effect and is estimated by the ratio of the distance of the point on the horizontal knee to the radius of the vertical knee. Further strengthening is achieved by increasing the radius of the horizontal knee of the frame.

Keywords: frame, negative charge of air, negative charge of the frame, repulsive forces, lever, radius of the vertical knee.

Citation: Shuleikin V.N., Kupovykh G.V. Performance assessment of the atmospheric electric dowsing mechanism // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 51–63. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art4> (In Russ.).

References

1. Shuleikin V.N., Shchukin G.G., Kupovykh G.V. The development of methods and tools of applied geophysics – atmospheric-electric monitoring of geological heterogeneities and zones of geodynamic processes. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2015. 206 p. (In Russ.).
2. Redin A.A., Kupovykh G.V., Boldyrev A.S. Electrodynamic model of the atmospheric convective-turbulent surface layer // Radiophysics and Quantum Electronics. 2014. Vol. 56, No. 11–12. P. 739–746. <https://doi.org/10.1007/s11141-014-9477-x>
3. Tverskoy P.N. The course of meteorology. Leningrad: Gidrometizdat, 1951. 887 p. (In Russ.).
4. Milne J. Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena // Trans. Seismol. Soc. Jap. 1890. Vol. 15. P. 135–164.
5. Chernyavsky E.A. Atmospheric-electrical precursors of earthquakes // Meteorology and hydrology in Uzbekistan: Collected papers. Tashkent: Academy of Sciences of the Uzbek SSR. 1955. P. 317–327. (In Russ.).
6. Mavlyanov G.A. The Tashkent earthquake on April 26, 1966 // Tashkent: FAN, 1971. 672 p. (In Russ.).
7. Chalmers J.A. The theory of electrode effect – I. Method and simple example // J. Atm. Terr. Phys. 1966. Vol. 28. P. 565–572. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(66\)90070-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(66)90070-5)
8. Chalmers J.A. The theory of electrode effect – II. Inclusion of condensation nuclei // J. Atm. Terr. Phys. 1966. Vol. 28. P. 573–579. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(66\)90071-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(66)90071-7)
9. Chalmers J.A. The theory of electrode effect – III. Restriction of assumptions // J. Atm. Terr. Phys. 1966. Vol. 28. P. 1029–1033. [https://doi.org/10.1016/S0021-9169\(17\)30033-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9169(17)30033-8)
10. Chalmers J.A. The theory of electrode effect – IV. Variation of ionization with height // J. Atm. Terr. Phys. 1967. Vol. 29. P. 217–219. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(67\)90136-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(67)90136-5)

11. Crozier W.D. Atmospheric electrical profiles below three meters // J. Geophys. Res. 1965. Vol. 70, No. 20. P. 2785–2790. <https://doi.org/10.1029/JZ070i012p02785>
12. Zhigalin A.D., Shuleikin V.N. Dowsing, nanotechnology and the prospects of applied and fundamental geophysics // Geology and Geophysics of the South of Russia. 2016. No. 2. P. 132–139. <https://doi.org/10.23671/vnc.2016.2.20813> (In Russ.).
13. Kibitkin V.V. Measurement of source field boundaries by biolocation method // Biophysical method. Modern research: Collected papers. Moscow: Popov Moscow Society for Radioengineering, Electronics and Communications, 2008. P. 32–39. (In Russ.).

Методический подход к прогнозу в нефтегазоносных бассейнах зон, благоприятных для формирования неантиклинальных ловушек

В.Л. Шустер

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва
E-mail: tshuster@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены цели, задачи, методы и виды геолого-геофизических исследований, а также критерии прогноза неантиклинальных ловушек нефти и газа на региональном этапе геологоразведочных работ. Сделаны предложения по усовершенствованию и систематизации существующих методических приемов по прогнозу неантиклинальных ловушек. Использованы геолого-геофизические материалы по месторождениям углеводородов и разведочным площадям Западной Сибири. Проведен комплексный анализ материалов сейсморазведки, данных ГИС и керна современными методами исследования.

Ключевые слова: нефть, газ, неантиклинальные ловушки, критерии прогноза, комплекс исследований.

Для цитирования: Шустер В.Л. Методический подход к прогнозу в нефтегазоносных бассейнах зон, благоприятных для формирования неантиклинальных ловушек // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 64–71. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art5>

На современном этапе развития нефтегазового комплекса РФ одним из важных направлений восполнения добычи нефти и газа приростом их ресурсов и запасов является прогноз и поиски нефтегазовых скоплений в сложнопостроенных резервуарах, в том числе, в неантиклинальных ловушках (НАЛ) разного типа. Это направление геологоразведочных работ (ГРР) актуально прежде всего из-за того, что фонд антиклинальных ловушек, в которых за все годы развития нефтегазовой отрасли в мире и России (и СССР) открыто подавляющее количество месторождений углеводородов (УВ), близок к исчерпанию.

За последние 10 лет в мире произошел резкий рост добычи УВ (до 10% от

общемирового уровня) преимущественно из неантиклинальных и комбинированных ловушек, особенно на месторождениях–гигантах [1, 2]. В неантиклинальных ловушках открыты, кроме мелких и средних по запасам, крупные и гигантские месторождения в России, США, Мексике, Венесуэле, на Ближнем Востоке, в Арабских Эмиратах [1–5].

Для широкого и целенаправленного проведения ГРР в сложнопостроенных резервуарах и повышения эффективности прогноза и поисков залежей нефти и газа в неантиклинальных ловушках необходимо создать регламентирующее методическое обеспечение, такого же типа, как «Положение об этапах и стадиях геологоразведочных работ на нефть и газ» (1983) [6].

Этот документ сыграл важную роль в открытии нефтегазовых месторождений и залежей, приуроченных к антиклинальным ловушкам. Однако используемый комплекс геолого-геофизических работ и сопутствующих исследований, применяемый для антиклинальных ловушек, оказался малоэффективным при прогнозе и поисках залежей нефти и газа в неантиклинальных ловушках.

Для прогноза и поиска залежей нефти и газа в неантиклинальных и комбинированных ловушках требуется специальный подход, новые методы и технологии, современные виды геолого-геофизических исследований и, в конечном итоге, новое методическое обеспечение в виде инструкции для всего комплекса ГРП.

Значительный вклад в разработку этой проблемы внесен учеными и производственниками разных стран, в том числе российскими (советскими) [1–4, 7–10]. Проведены детальные исследования, были созданы методические рекомендации и инструкции [4].

В рамках настоящей статьи излагаются авторские предложения по совершенствованию методики прогноза сложнопостроенных ловушек УВ. С учетом анализа ранее выполненных разработок [1–10], накопленной геолого-геофизической информации, новых и усовершенствованных «старых» методических приемов проведения ГРП на нефть и газ предпринята попытка дополнить и систематизировать подходы к прогнозу и поискам неантиклинальных ловушек, определив последовательность решаемых задач, виды геолого-геофизических работ и исследований, критерии прогноза и поиска УВ. Ниже

рассмотрены наиболее значимые предложения методического характера.

Региональный прогноз должен включать в себя выделение на изучаемой территории (или в НГБ) зон и участков, в некоторых случаях и перспективных объектов, с благоприятными геологическими условиями для формирования неантиклинальных ловушек различного генетического типа. Эта задача решается на основе использования комплекса геолого-геофизических работ, геохимических и гидрогеологических исследований и соответствующих каждому генетическому типу ловушек критериев прогноза.

Локальный прогноз неантиклинальных ловушек согласно работе [4] – это, по существу, задача выявления и поисков залежей УВ в НАЛ при детализации строения конкретной разведочной площади. В последующем – установление типа и уточнение морфологии ловушки с присущими поисково-разведочному этапу задачами, методами работ, видами исследований и критериями.

Еще одно принципиальное отличие от предлагаемых подходов к прогнозу и выявлению НАЛ [3, 4], заключается в необходимости создания «универсального» методического руководства, с обобщенным опытом по большинству нефтегазоносных бассейнов, где открыты скопления УВ в НАЛ. Этот документ должен быть регламентирующим, утвержденным на государственном уровне, и обязательным для исполнения в геологических организациях, проводящих поисковые работы в сложнопостроенных резервуарах с видами работ и исследований, необходимых и ранее не предусмотренных в Положении [6].

Естественно, в каждом регионе (бассейне), исходя из особенностей геологического строения, в «методическое руководство» будут внесены дополнения в виды работ и исследований. А критерии прогноза и поиска могут и будут различаться по регионам. В том числе, это будет касаться работ и исследований для разных по генезису и морфологии типов ловушек.

Однако виды работ и исследований, указанные в «универсальном» методическом руководстве, должны неукоснительно выполняться в каждом регионе для успешного прогноза и поиска неантиклинальных ловушек.

Переходя к задачам прогноза неантиклинальных ловушек, необходимо обозначить объект этих исследований.

Неантиклинальные ловушки нефти и газа, в отличие от антиклинальных (структурных), – это, как правило, сложнопостроенные природные резервуары, по разному экранированные, различного генезиса и морфологии, зачастую сравнительно небольшие по объему и площади, что существенно усложняет их прогноз и последующие поиски. Формирование неантиклинальных ловушек происходит под совокупным воздействием ряда геологических факторов: седиментационных и постседиментационных, структурно-тектонических и др.

Сформированная неантиклинальная ловушка характеризуется проницаемой частью (породы-коллекторы) и ограничивающим ее экраном – флюидоупором. Тип ловушки определяется соотношением коллектора и флюидоупора и факторами ее формирования.

Исходя из этого, цель «прогноза» должна включать в себя оценку

благоприятных условий для формирования таких природных резервуаров, выявление зон и участков предполагаемого распространения неантиклинальных ловушек различного типа.

Прогноз неантиклинальных ловушек нельзя рассматривать отдельно от основной задачи поисковых работ – открытия залежей нефти и газа. Необходимо опираться на нефтегазогеологическое районирование территорий, с выделением зон нефтегазонакопления (ЗНГН).

В большинстве нефтегазоносных бассейнов (НГБ) РФ такое районирование проведено. В некоторых регионах Восточной Сибири, Дальнего Востока и шельфов северных и восточных морей остаются неисследованными региональными работами отдельные нефтегазоносные области. Комплекс геолого-геофизических работ на региональном этапе достаточно детально разработан в [6].

В хорошо изученном Западно-Сибирском НГБ и многих других детальное нефтегазогеологическое районирование проведено с выделением нефтегазоносных областей (НГО), районов (НГР) и зон нефтегазонакопления (ЗНГН). ЗНГН – это часть НГО с доказанной нефтегазоносностью, выявленной в антиклинальных ловушках и прогнозируемой (а в ряде случаев, и уже доказанной) в неантиклинальных ловушках.

Базовым объектом для прогноза зон и участков, благоприятных для формирования неантиклинальных ловушек разного типа, на региональном этапе геологоразведочных работ является зона нефтегазонакопления – элемент нефтегазогеологического районирования, с доказанной продуктивностью.

С ЗНГН ассоциируется понятие «природный мегарезервуар с единой гидродинамической системой» [7], в котором скопления нефти и газа, в том числе крупные и гигантские, приурочены как к антиклинальным, так и к неантиклинальным и комбинированным ловушкам. К ловушкам, имеющим широкое площадное распространение, приурочены, как правило, крупные и гигантские залежи УВ.

В качестве примера можно привести мегарезервуар Бованенковско-Харасавейской зоны на Ямальском полуострове Западной Сибири.

Это мировой узел газонакопления. Здесь сосредоточены крупные и средние по запасам залежи газа, газоконденсата и нефтегазоконденсата, приуроченные к антиклинальным, неантиклинальным разного типа и комбинированным ловушкам [5].

Классификация природных резервуаров и их элементов – неантиклинальных ловушек разработана в ряде работ, в том числе наиболее детально в [3, 4, 8–11]. В основу классификаций положены генетический и морфологический принципы. На стадии региональных работ, исходя из существующего регламентирующего документа [6], необходимо определить благоприятные предпосылки для прогноза новых перспективных комплексов и зон нефтегазонакопления.

Для достижения поставленной цели прогноза, выявления и оконтуривания зон и участков, благоприятных для формирования неантиклинальных ловушек разного генетического и морфологического типов, основываясь на имеющихся геолого-геофизических материалах, необходимо решить следующие задачи: выделить в разрезе перспективные региональные

нефтегазоносные литолого-стратиграфические комплексы (породы-коллекторы и флюидоупоры), исследовать генезис и распространение коллекторской толщи и структурное соотношение коллекторов с флюидоупорами; установить (или спрогнозировать) распространение региональных зон выклинивания и фациального замещения осадочных комплексов, стратиграфических несогласий, региональных и зональных флюидоупоров, изучить геохимические процессы нефтегазообразования и нефтегазонакопления, а также гидрогеологические условия формирования и сохранения скоплений УВ. Региональный комплекс геолого-геофизических работ включает полевые геофизические, в первую очередь, региональные сейсмические исследования, а также гравиразведку, магниторазведку, аэро- и космическую съемку. Выполняется бурение параметрических и оценочных скважин с учетом результатов бурения опорных и структурных скважин прежних лет.

Комплекс исследований включает анализ геолого-геофизических материалов, включая полевые геофизические результаты, данные ГИС и керн, геохимические и гидрогеологические характеристики разреза.

Обязательные методы исследования: бассейновый анализ, сейсмо-стратиграфический анализ, комплексный палеотектонический, палеогеографический и палеогеоморфологический анализы, геохимические и гидрогеологические методы изучения разреза.

Обработка материалов и построение геологических моделей осуществляется с использованием современных программных комплексов.

В результате палеорекопструкций будет восстановлена история геологического строения региона, с выделением литолого-фациальных зон, границ их выклинивания и замещения. Построение сейсмостратиграфических разрезов позволит уточнить границы выклинивания пород-коллекторов и распространения региональных и зональных флюидоупоров.

На основе литофациальных карт, построенных на современной структурной основе (в масштабе 1:100000 и 1:200000), возможен прогноз зон и участков, благоприятных для поиска неантиклинальных ловушек.

Критерии регионального прогноза зон и участков с благоприятными условиями для формирования неантиклинальных ловушек следующие: региональные зоны стратиграфических несогласий, зоны выклинивания и замещения коллекторских толщ, участки экранирования коллекторских толщ региональными и зональными флюидоупорами, а также разрывными нарушениями.

На следующем – поисковом этапе ГРП целью работ являются выявление и поиски на разведочных площадях неантиклинальных ловушек различного генетического и морфологического типа, с соответствующими задачами, видами работ,

комплексом исследований и критериями поиска ловушек.

На разведочном этапе ГРП осуществляется детализация строения и анализ геолого-промысловых параметров залежей УВ, приуроченным к неантиклинальным ловушкам.

Выводы

В результате проведенного исследования уточнены задачи регионального прогнозирования зон, благоприятных для формирования и распространения неантиклинальных ловушек, предложены рациональный комплекс работ и исследований, критерии прогноза таких зон.

На региональном этапе ГРП, на основе получаемых геолого-геофизических материалов, возможен региональный прогноз зон, благоприятных для формирования неантиклинальных ловушек нефти и газа

Локальный прогноз [3, 4] неантиклинальных ловушек – это фактически задача выявления и поисков ловушек различного типа, решаемая на поисково-разведочном этапе ГРП на основе анализа геолого-геофизических материалов и комплекса исследований материалов бурения, сейсморазведки и ГИС.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания (тема «Развитие научно-методических основ поисков крупных скоплений УВ в неструктурных ловушках комбинированного типа в пределах платформенных нефтегазоносных бассейнов», № АААА-А19-119022890063-9).

Литература

1. Dolson J., He Zh., Horn B.W. Advances and perspectives on stratigraphic trap exploration – making the subtle trap obvious // Search and Discovery. Article 60054. 2018. 67 p.
2. Геология гигантских месторождений нефти и газа / Под ред. М. Хэлбути. М.: Мир, 1973. 440 с.

3. *Алексин А.Г., Гогоненков Г.Н., Хромов В.Т. и др.* Методика поисков залежей нефти и газа в ловушках сложноэкранированного типа. В 2-х частях. М.: ВНИИОЭНГ, 1992. 447 с.
4. *Гусейнов А.А., Гейман Б.М., Шик Н.С., Сурицков Г.В.* Методика прогнозирования и поисков литологических, стратиграфических и комбинированных ловушек нефти и газа. М.: Недра, 1988. 213 с.
5. *Шустер В.Л., Дзюбло А.Д., Шнип О.А.* Залежи углеводородов в неантиклинальных ловушках Ямальского полуострова Западной Сибири // Георесурсы. 2020. Т. 22, № 1. С. 39–45. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.39-45>
6. Положение об этапах и стадиях геологоразведочных работ на нефть и газ. М.: ВНИГНИ, 1983. 16 с.
7. *Абукова Л.А., Карцев А.А.* Флюидные системы осадочных нефтегазоносных бассейнов (типы, основные процессы, пространственное распространение) // Отечественная геология. 1999. № 2. С.11–16.
8. *Окнова Н.С.* Неантиклинальные ловушки и их примеры в нефтегазоносных провинциях // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7, № 1. С. 16. http://www.ngtp.ru/rub/10/10_2012.pdf (Дата обращения 15.07.2020).
9. *Габриэлянц Г.А., Порожун В.И., Сорокин Ю.В.* Методика поисков и разведки залежей нефти и газа. М.: Недра, 1985. 304 с.
10. *Поляков А.А., Колосов В.Н., Фончикова М.Н.* К вопросу о классификации залежей нефти и газа // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2015. Т. 10, № 1. С. 10. https://doi.org/10.17353/2070-5379/7_2015
11. *Жемчугова В.А., Бербенев М.О.* Основные принципы моделирования структуры природных резервуаров (на примере меловых отложений Западной Сибири) // Георесурсы. 2015. № 2(61). С. 54–62. <https://doi.org/10.18599/grs.61.2.5>

Methodical approach to forecasting zones in oil and gas bearing basins favorable for the formation of non-anticlinal traps

V.L. Shuster

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: tshuster@mail.ru

Abstract. The article discusses the goals, objectives, methods and types of geological and geophysical studies, as well as the forecast criteria for non-anticlinal oil and gas traps at the regional stage of exploration. Proposals are made to improve and systematize existing methods for predicting non-anticlinal traps. Geological and geophysical data on hydrocarbon deposits and exploration areas of Western Siberia are utilized. Comprehensive analysis of seismic data, well logs and core data is carried out using modern research methods.

Keywords: oil, gas, non-anticlinal traps, forecast criteria, set of studies.

Citation: *Shuster V.L.* Methodical approach to forecasting zones in oil and gas bearing basins favorable for the formation of non-anticlinal traps // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 64–71. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art5> (In Russ.).

References

1. *Dolson J., He Zh., Horn B.W.* Advances and perspectives on stratigraphic trap exploration – making the subtle trap obvious // Search and Discovery. Article 60054. 2018. 67 p.
2. *Geology of giant petroleum fields* / Ed. by M.T. Halbouty. Moscow: Mir, 1973. 440 p. (In Russ.).
3. *Aleksin A.G., Gogonenkov G.N., Khromov V.T.* et al. Methods of searching for oil and gas deposits in traps of complex screening type. In 2 parts. Moscow: VNIOENG, 1992. 447 p. (In Russ.).
4. *Guseinov A.A., Geiman B.M., Shik N.S., Surtsukov G.V.* Methods of forecasting and searching for lithological, stratigraphic and combined oil and gas traps. Moscow: Nedra, 1988. 213 p. (In Russ.).
5. *Schuster V.L., Dziublo A.D., Shnip O.A.* Hydrocarbon deposits in non-anticlinal traps of the Yamal Peninsula of Western Siberia // Georesursy. 2020. Vol. 22, No. 1. P. 39–45. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.39-45>
6. *Regulation on the stages and stages of exploration for oil and gas.* Moscow: VNIGNI, 1983. 16 p. (In Russ.).
7. *Abukova L.A., Kartsev A.A.* Fluid systems of sedimentary oil and gas basins (types, main processes, spatial distribution) // National Geology. 1999. No. 2. P. 11–16. (In Russ.).
8. *Oknova N.S.* Nonanticlinal traps – examples from Volga-Ural and Western Siberia oil-and-gas province // Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika. 2012. Vol. 7, No. 1. P. 16. http://www.ngtp.ru/rub/10/10_2011.pdf (Accessed on 15.07.2020). (In Russ.).
9. *Gabrielyants G.A., Poroskun V.I., Sorokin Yu.V.* Methodology of prospecting and exploration of oil and gas deposits. Moscow: Nedra, 1985. 304 p. (In Russ.).

10. *Polyakov A.A., Kolosov V.N., Fonchikova M.N.* On the classification of petroleum accumulations // *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*. 2015. Vol. 10, No. 1. P. 10. https://doi.org/10.17353/2070-5379/7_2015 (In Russ.).

11. *Zhemchugova V.A., Berbenev M.O.* Basic principles for modeling reservoir structure (on the example of Cretaceous deposits of Western Siberia) // *Georesursy*. 2015. No. 2(61). P. 54–62. <https://doi.org/10.18599/grs.61.2.5> (In Russ.).

Изучение деструкции гелей полимерно-гелевой системы на основе реагента «Темпоскрин-Плюс»

В.Б. Демьяновский^{1,2*}, Д.А. Каушанский^{1,2}, Н.Р. Бакиров^{1,2}

1 – Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

2 – ООО НТФ «Атомбиотех», г. Москва

E-mail: *demian20@yandex.ru

Аннотация. Существует огромное количество типов работ на скважинах, которые связаны с закачкой различных реагентов в пласт через скважину. При этом может возникать потребность в разрушении и удалении используемых реагентов, связанная с нештатными либо технологическими проблемами, например, нежелательное ухудшение фильтрационных свойств пласта в призабойной зоне, блокирование ствола или забоя скважины. В таком случае применяют деструкторы – реагенты, которые разрушают либо изменяют физико-химические свойства определенных химических продуктов, после чего они могут быть легко удалены из скважины. Реагент «Темпоскрин-Плюс» применяется для технологии ограничения водопритокров. В данной статье приводятся результаты лабораторных исследований эффективности различных деструкторов для разрушения полимерно-гелевых систем на базе реагента «Темпоскрин-Плюс». Также описаны некоторые аспекты методов изучения физико-химических свойств полимерных дисперсных систем.

Ключевые слова: Темпоскрин-Плюс, полимерно-гелевая система, деструкция полимерных гелей, полиэлектролитные свойства, гелевые частицы.

Для цитирования: Демьяновский В.Б., Каушанский Д.А., Бакиров Н.Р. Изучение деструкции гелей полимерно-гелевой системы на основе реагента «Темпоскрин-Плюс» // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 72–81. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art6>

Введение

Для выравнивания профиля приемистости и для ограничения водопритокров в нефтяных и газовых скважинах находят все большее применение полимерно-гелевые системы (ПГС) на основе реагента «Темпоскрин» [1] и его усовершенствованного аналога «Темпоскрин-Плюс» [2]. Реагент «Темпоскрин-Плюс» представляет собой порошкообразный радиационно-сшитый анионный полиакриламид с добавкой термостабилизатора. Используется этот реагент в двух технологиях нефтедобычи: для выравнивания профиля приемистости нагнетательных скважин и для ограничения водопритокров в добывающих скважинах. При

штатном смешении с водой в концентрации до 0,5–2%, в зависимости от минерализации, образуется текучая дисперсная полимерно-гелевая система, содержащая в своем составе упругие частицы гелей размером до 10 мм [3]. При необходимости удалить такую систему из забоя скважины и колонны можно промывкой скважины водой через трубное или затрубное пространство скважины.

Необходимость в деструкции полимерных гелей возникает в нефтедобыче для ликвидации нештатных ситуаций и как элемент технологии. Под деструкцией гелей в настоящей работе понимается разрушение структуры геля до состояния жидкости, происходящее под действием специальных химических веществ.

В обзорной работе [4] проведен анализ и выделены три группы деструкторов (брейкеров) для вязкоупругих систем (ВУС) на основе полисахаридов: кислотные, окислительные и энзимные. Однако полимерно-гелевая система «Темпоскрин-Плюс» относится к классу полиакриламидных гелей, информации по деструкции которых крайне мало. Практическим путем было выяснено, что энзимные и кислотные деструкторы для полиакриламида не позволяют эффективно разрушить механическую структуру геля. В качестве окислительных деструкторов полимерных гелей при очистке призабойной зоны скважины предлагался ряд веществ: пероксид карбоната натрия, персульфат аммония, перекись водорода, монопероксид мочевины [5, 6], гипохлорит натрия в составе водоизолирующей композиции [7]. Лабораторная апробация показала, что среди известных веществ наибольшей скоростью деструкции для ПГС типа «Темпоскрин-Плюс» обладают окислители, широко используемые в быту и промышленности:

1 – гипохлорит натрия. ГОСТ 11086-76 (Содержание активного хлора 170–190 г/л);

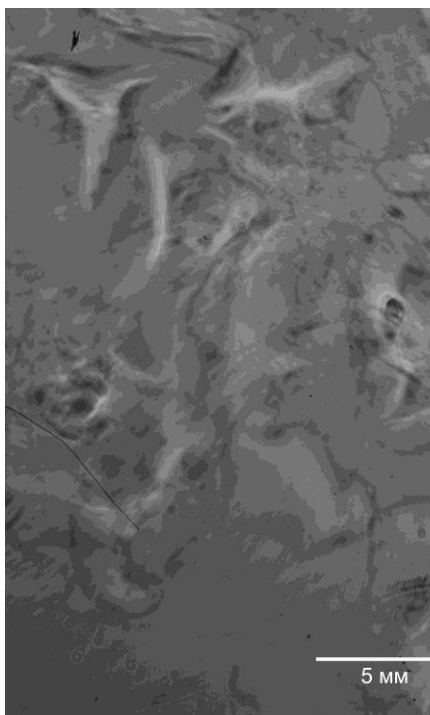
2 – перекись водорода. ГОСТ 177-88 (содержание перекиси в пределах 30–40%).

Для оценки деструкции полимерно-гелевой системы использовали оптические и реологические методы. Оптических методов два – прямое фотографирование состояния ПГС в стеклянной кювете размером 130×30×40 мм и микрофотография отдельных гелевых частиц. Для реализации реологического метода применялся вискозиметр условной вязкости ВЗ-246 (ГОСТ 9070-75). Измерение вязкости на данном вискозиметре заключается в измерении времени истечения 100 мл жидкости через отверстие диаметром 6 мм в секундах. Выбор

этого вискозиметра связан с тем, что получаемые значения условной вязкости учитывают не только силы внутреннего трения, возникающие в вязкой жидкости, но и силы внешнего трения, создаваемые отдельными гелевыми частицами при движении через перфорационные отверстия скважин (5–10 мм). Вискозиметры аналогичного типа, например, вискозиметр Марша, также включены в состав стандартов (ГОСТ 33213-2014; ISO 10414-1:2008), применяемых для контроля свойств буровых растворов при работах на нефтяных и газовых скважинах. Преимущество вискозиметра ВЗ-246 состоит в малом объеме пробы для исследования (100 мл) по сравнению с вискозиметром Марша, для которого этот объем в 10 раз больше. Следует также отметить, что испытания на данном вискозиметре в определенной степени моделируют течение ПГС в трещиновато-поровом коллекторе, в котором роль трещины выполняет сопло диаметром 6 мм, через которое проходят гели близкого размера. Следует отметить, что такие гели по классификации, приведенной в работе [8], относят к гелям миллиметрового диапазона. Использование ротационного вискозиметра Брукфилда для измерения вязкости ПГС позволяет формально получать численные значения вязкости, но они часто неустойчивы из-за двухфазного характера системы и их трудно сопоставить с реологией ПГС в скважине и пласте.

В настоящей работе в качестве показателей деструкции геля используется время полного разрушения гелей до состояния вязкости воды, а также видимое отсутствие гелевых частиц. В случае разбавленных ПГС и систем на основе воды с низким рН условная вязкость не равна вязкости воды, но при этом система может находиться в текучем состоянии.

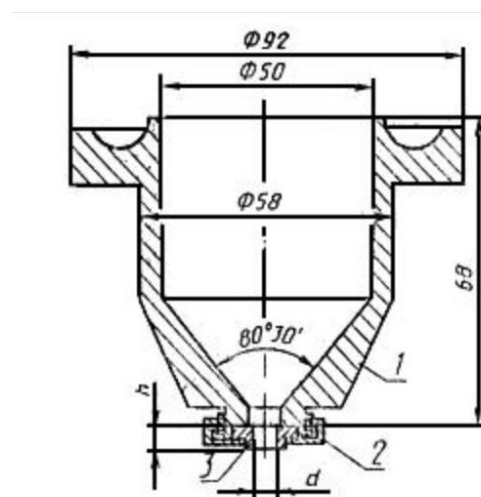
ПГС «Темпоскрин-Плюс», обладающие текучестью, могут быть приготовлены с концентрацией реагента в воде до 5%. Измеряемая условная вязкость при этом находится в пределах от 5 с (время истечения чистой воды) до остановки течения. Прекращение течения ПГС через вискозиметр может быть вызвана отсутствием свободной жидкой фазы или образованием упругих гелевых частиц большого размера, которые не могут проходить через отверстие вискозиметра ВЗ-246. В силу полиэлектролитных свойств гелевых частиц системы «Темпоскрин-Плюс» размеры гелевых частиц могут зависеть от pH



а

и минерализации водной среды, что проявляется в зависимости условной вязкости от этих показателей, при этом влияние pH оказывается более заметным.

Основным рабочим состоянием ПГС «Темпоскрин-Плюс» является дисперсное состояние с величиной условной вязкости до 60 с. В случае разбавленной ПГС с концентрацией реагента «Темпоскрин-Плюс» отдельные частицы гелей имеют размер в пределах 1–10 мм, как это видно на рис. 1, а, где представлена микрофотография гелевых частиц реагента с масштабной шкалой. На рис. 1, б приведены размеры конструкции вискозиметра ВЗ-246.



1 - резервуар; 2 - гайка; 3 - сопло

б

Рис. 1. Сравнение размеров частиц гелей дисперсной полимерно-гелевой системы на микрофотографии (а) и геометрических размеров вискозиметра ВЗ-246 (б)

Сравнение показывает, что размеры сопла в вискозиметре, оцениваемые в единицах площади, при исследовании ПГС «Темпоскрин-Плюс» сопоставимы с размерами гелевых частиц, а размер самого сопла можно сопоставить с размером трещин в трещиноватом коллекторе. Из

работы [9] следует вывод о том, что размер трещин в реальном пласте гораздо больше, чем их размер, определяемый в лабораторных условиях, из-за установленной зависимости роста проницаемости кернов от их геометрических размеров.

Поэтому результаты измерения условной вязкости в практическом плане могут оказаться более полезными, чем просто измерение вязкости на ротационном вискозиметре. Альтернативой изучения фильтрационных свойств ПГС могли бы стать опыты на насыпном керне на породе с проницаемостью около 1 Дарси, однако при этом часто требуется создание значительного перепада давления для прокачки геля, при том, что результаты больше свидетельствуют о прочности самих гелей, а не об их подвижности в пласте.

В случае однородного низкопроницаемого пласта, медленной закачки ПГС в скважину, а также отклонения от технологического режима приготовления для данной скважины концентрации реагента возможно концентрирование гелевых частиц на забое скважины, которые при контакте с пластовыми водами в прискважинном пространстве могут образовать сплошной гель. Такой гель необходимо разрушить с целью восстановления гидродинамической связи между объемом скважины и пластом.

Экспериментальная часть

Моделирование различных ситуаций образования и разрушения сплошного геля

осуществлялось в два этапа. На первом этапе были приготовлены образцы полимерно-гелевых систем на основе модели пластовой воды с минерализацией 20 г/л и pH=7, с концентрацией реагента «Темпоскрин-Плюс» 0,75%, 1,5% и 2%. Учитывая, что в технологии ограничения водопритоков применяется вода с pH=1, для контроля были подготовлены образцы ПГС также с этим значением pH. Приготовление ПГС выполнялось путем смешения реагента и воды в течение 2-х часов при 20 °С.

На втором этапе проводилось изучение деструкции приготовленных гелевых систем. Опыт по деструкции геля состоял в том, что к 50 мл ПГС с pH=7 добавляли такое же количество деструктора – гипохлорита натрия или перекиси водорода. Сразу после контакта с деструктором засекали время начала эксперимента и наблюдали за состоянием систем визуально – при исчезновении гелевой структуры фиксировалось время. Далее образцы фотографировали в стеклянной кювете и испытывали на вискозиметре ВЗ-246. На двух сериях контрольных образцов на основе воды с разными pH отслеживали стабильность системы без деструкторов в течение суток. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний на деструкцию ПГС «Темпоскрин-Плюс»

Содержание реагента в ПГС, %	Деструктор	Концентрация деструктора	Время разрушения геля, час	Вязкость условная, с
1	2	3	4	5
0,75%	NaOCl	190 г/л	0,3	5
	H ₂ O ₂	30%	6	5
	без дестр. pH=7	–	стабилен	12
	без дестр. pH=1	–	стабилен	6
1,5%	NaOCl	190 г/л	0,3	5
	H ₂ O ₂	30%	12	5
	без дестр. pH=7	–	стабилен	гель
	без дестр. pH=1	–	стабилен	7

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
2%	NaOCl	190 г/л	0,9	5
	H ₂ O ₂	30%	16	5
	без дестр. pH=7	–	стабилен	гель
	без дестр. pH=1	–	стабилен	8

Фотографии ПГС до и после разрушения геля представлены на рис. 2.










Содержание ТС + в ПГС, %	Без деструктора	Деструктор – NaClO	Деструктор – H ₂ O ₂
0,75			
1,5			
2,0			

Рис. 2. Фотографии состояния ПГС «Темпоскрин-Плюс» при контакте с деструкторами

Производилось прямое фотографирование образцов в прямоугольных кюветах из оптического стекла с размерами 30×40×130 мм, на камеру с разрешением 48 МП, в проходящем свете на фоне светодиодного светильника, с размерами матрицы 150×150 мм, мощностью 18 Вт, цветовая температура 4000К.

Как видно из представленных данных, оба испытанных деструктора оказываются эффективными, однако скорость деструкции ПГС под действием гипохлорита натрия оказывается выше. Фиксация разрушения одинаково хорошо фиксируется как по показателю условной вязкости, так и по прямому наблюдению состояния геля в оптической кювете.

Продукты разрушения гипохлоритом натрия имеют зеленовато-желтый оттенок. Продукты разрушения перекисью водорода при содержаниях реагента 0,75 и 1,5% имеют розовый оттенок.

В отсутствие контакта с деструктором, как показывают данные табл. 1, ПГС «Темпоскрин-Плюс» вне зависимости от величины pH остается стабильной во времени, но при этом вязкость системы с меньшим значением pH существенно ниже. Это обстоятельство связано не с кислотной деструкцией гелей, а с их полиэлектролитным характером. Полиэлектролитные свойства гелей возникают вследствие того, что около 30% звеньев полиакриламидной основы геля гидролизованы до карбонильных групп. Снижение pH воды приводит к появлению диссоциации ионогенных групп полимера и подавлению полиэлектролитных свойств, что в принципе

должно привести к снижению вязкости раствора.

Однако анализ структуры гидролизованного полимера дает основание предполагать, что снижение вязкости, кроме того, может также дополнительно происходить и за счет ассоциации карбонильных неионизированных групп, образования нековалентной водородной связи между ними, следствием чего возможно образование межмолекулярных сшивок и надмолекулярных структур, подобных рассматриваемым в супрамолекулярной химии [10].

Третий этап был направлен на изучение времени деструкции при различных концентрациях деструктора под воздействием температуры в 20 °С, 60 °С и 80 °С. Для этого к гелям объемом в 50 мл с концентрацией реагента «Темпоскрин-Плюс» 2,0%, pH=7, добавлялись растворы в объеме 50 мл с различным содержанием выбранных деструкторов (перекись водорода 30%; гипохлорит натрия с содержанием активного хлора 170–190 г/л): 100%, 50%, 25% и 10% (к объему ПГС). Далее визуально оценивали деструкцию гелей. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Исходя из полученных данных видно, что с уменьшением концентрации деструктора происходит увеличение времени разрушения гелей, а с увеличением температуры увеличивается скорость разрушения. При этом полное разрушение гелей с использованием гипохлорита натрия происходит при концентрациях деструктора не менее 50%.

Таблица 2

Результаты испытаний различных концентраций деструктора при разрушении гелей

Деструктор	Содержание деструктора в растворе, %	Время разрушения, час		
		при 20 °С	при 60 °С	при 80 °С
H ₂ O ₂	100%	16,0	0,8	0,7
	50%	24,0	0,9	0,7
	25%	42,5	1,2	0,8
	10%	45,0	1,2	1,0
NaOCl	100%	0,9	0,8	0,6
	50%	2,5	0,9	0,8
	25%	–	2,2	–
	10%	–	–	–

Выводы

1. Оптическим и реологическим методами показано, что при смешении реагента «Темпоскрин-Плюс» с водой формируются гелевые частицы миллиметрового диапазона, сохраняющие при этом возможность движения через каналы той же размерности, как то: сопло вискозиметра ВЗ-246 или трещина в карбонатном коллекторе нефти.

2. Результаты измерений свойств полимерно-гелевой системы «Темпоскрин-Плюс» показали, что использование кислот в качестве деструкторов (на примере соляной кислоты) не приводит к разрушению гелей реагента «Темпоскрин-Плюс», но приводит к снижению объема гелей за счет подавления

полиэлектролитного набухания и, возможно, дополнительной нековалентной сшивки полимерных цепей.

3. Установлено, что контакт полимерно-гелевой системы «Темпоскрин-Плюс» с такими окислителями как гипохлорит натрия и перекись водорода при различных концентрациях в воде и температуре приводит к необратимой деструкции гелей. Время, необходимое для полной деструкции при комнатной температуре снижается с ростом концентрации окислителей в воде и минимально для концентрированных растворов гипохлорита натрия – 0,9 часа, а для перекиси водорода – 16 часов. При температурах 60–80°С время деструкции для обоих соединений составляет 0,6–0,9 часа.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности (фундаментальные, поисковые и прикладные исследования)», № АААА-А19-119013190038-2).

Литература

1. Каушанский Д.А., Демьяновский В.Б. Патент SU 1669404 АЗ. Добавка к закачиваемой в пласт воде «Темпоскрин» и способ получения добавки. № 4713456/03; Заявл. 03.04.1989; Оpubл. 10.06.1999 // Изобретения. Полез. модели. Бюл. № 16. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>
2. Каушанский Д.А., Демьяновский В.Б. Инновационная технология ограничения водопитока в добывающих скважинах «Темпоскрин-Плюс» // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 1(20). С. 22. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-20.art22>

3. Барабанов В.Л., Демьяновский В.Б., Каушанский Д.А. Изучение реологической неоднородности жидких систем на примере набухших в воде дисперсных гелей полиакриламида // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2016. Вып. 1(13). С. 4. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-13.art4>
4. Окроелидзе Г.В., Некрасова И.Л., Гаришина О.В. и др. Изучение процесса диспергирования вязкоупругих составов под влиянием реагентов-деструкторов различной химической природы // Башкирский химический журнал. 2016. Т. 23, № 2. С. 32–40.
5. Сиданск Р.Д. А.с. SU 1519531 АЗ. Способ восстановления проницаемости скважины или вблизи нее в жидкостных коммуникациях подземной формации. № 3973323; Заявл. 11.11.1985; Оpubл. 30.10.1989 // Изобретения. Полез. модели. Бюл. № 40. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>
6. Старкова Н.Р., Марданов М.Ш., Бодрягин А.В. и др. Патент RU 2190753 С1. Способ временной изоляции интервала продуктивного пласта. № 2001117410/03; Заявл. 21.06.2001; Оpubл. 10.10.2002 // Изобретения. Полез. модели. Бюл. № 28. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>
7. Кадыров Р.Р., Хасанова Д.К., Саханова А.К. и др. Патент RU 2584193 С1. Способ изоляции водопритокков в скважине. № 2015110276/03; Заявл. 23.03.2015; Оpubл. 20.05.2016 // Изобретения. Полез. модели. Бюл. № 14. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>
8. Bai B., Zhou J., Yin M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control // Petroleum Exploration and Development. 2015. Vol. 42, No. 4. P. 525–532. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(15\)30045-8](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(15)30045-8)
9. Гурбатова И.П., Глушков Д.В., Рехачев П.Н. и др. Особенности изучения карбонатных пород-коллекторов лабораторными методами. Пермь: ЛУКОЙЛ-Инжиниринг, 2017. 264 с.
10. Лен Ж.-М. Супрамолекулярная химия: Концепции и перспективы / Пер. с англ. Е.В. Болдыревой. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1998. 334 с.

Study of the degradation of the gels of polymer-gel system based on Temposcreen-Plus reagent

V.B. Demyanovsky^{1,2*}, D.A. Kaushansky^{1,2}, N.R. Bakirov^{1,2}

1 – Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

2 – Research and Technology Company Atombiotech LLC, Moscow

E-mail: *demian20@yandex.ru

Abstract. There are a huge number of types of well operations that involve pumping various reagents into the reservoir through the well. In this case, there may be a need for destruction and removal of the reagents used, associated with non-standard or technological problems, for example, undesirable deterioration of the filtration properties of the reservoir in the bottom-hole zone, blocking the well or bottom of the well. In this case, breakers are used – reagents that destroy or change the physical and chemical properties of certain chemical products, after which they can be easily removed from the well. Temposcreen-Plus reagent is applied for water shutoff. This article presents the results of laboratory studies of the effectiveness of various breakers for the destruction of polymer-gel systems based on the Temposcreen-Plus reagent. Some aspects of methods for studying the physical and chemical properties of polymer dispersed systems are also described.

Keywords: Temposcreen-Plus, polymer-gel system, destruction of polymer gels, polyelectrolyte properties, gel particles.

Citation: Demyanovsky V.B., Kaushansky D.A., Bakirov N.R. Study of the degradation of the gels of polymer-gel system based on Temposcreen-Plus reagent // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 72–81. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art6> (In Russ.).

References

1. Kaushansky D.A., Demyanovsky V.B. Pat. SU 1669404 A3. Temposcreen additive to the water injected into the formation and a method for obtaining an additive. No. 4713456/03; Statement 03.04.1989; Publ. 10.06.1999 // Inventions. Useful models. 1999. Bull. No. 16. – Available at: <http://www1.fips.ru> (In Russ.).
2. Kaushansky D.A., Demyanovsky V.B. Innovative water suppression technology for production wells “Temposcreen-Plus” // Actual Problems of Oil and Gas. 2018. Iss. 1(20). P. 22. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-20.art22> (In Russ.).
3. Barabanov V.L., Demyanovsky V.B., Kaushansky D.A. The study of rheological heterogeneity of the liquid systems in the instance of the water-swollen dispersed gels of polyacrylamide // Georesources, Geoenergetics, Geopolitics. 2016. Iss. 1(13). P. 4. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-13.art4> (In Russ.).
4. Okromelidze G.V., Nekrasova I.L., Garshina O.V. et al. The study of viscoelastic gels dispersion by applying of breakers of different chemical nature // Bashkirskii Khimicheskii Zhurnal. 2016. Vol. 23, No. 2. P. 32–40. (In Russ.).
5. Sydansk R.D. A.C. SU 1519531 A3. Method for restoring the permeability of a well or near it in the liquid communications of an underground formation. No. 3973323; Declared 11.11.1985; Publ. 1989. Bull. No. 40. – Available at: <http://www1.fips.ru> (In Russ.).

6. *Starkova N.R., Mardanov M.Sh., Bodrjagin A.V.* et al. Pat. RU 2190753 C1. Process of temporary insulation of interval of active pool. No. 2001117410/03; Declared 21.06.2001; Publ. 10.10.2002. Bull. No. 28. – Available at: <http://www1.fips.ru>
7. *Kadyrov R.R., Khasanova D.K., Sakhapova A.K.* et al. Pat. RU 2584193 C1. Method for isolation of water influx in well. No. 2015110276/03; Declared 23.03.2015; Publ. 20.05.2016. Bull. No. 14. – Available at: <http://www1.fips.ru>
8. *Bai B., Zhou J., Yin M.* A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control // Petroleum Exploration and Development. 2015. Vol. 42, No. 4. P. 525–532. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(15\)30045-8](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(15)30045-8)
9. *Gurbatova I.P., Glushkov D.V., Rekhachev P.N.* et al. Features of studying carbonate reservoir rocks using laboratory methods. Perm: LUKOIL-Engineering, 2017. 264 p.
10. *Lehn J.-M.* Supramolecular chemistry: concepts and perspectives. Weinheim; Basel: VCH. 271 p.

Информативность космических снимков сверхвысокого разрешения в задачах мониторинга влажности тундрового покрова

С.Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва
E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Аннотация. Обоснована принципиальная возможность использования мультиспектральных космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения для мониторинга влажности тундрового покрова. Результаты анализа спектральных изображений со спутника QuickBird в районе строительства взлетно-посадочной полосы пос. Сабетта (п-ов Ямал) свидетельствуют об очевидной связи коэффициентов отражения в красной ($\rho_{кр}$) и ближней инфракрасной ($\rho_{бик}$) областях с типами местности разной степени дренирования. Возможность оценки изменений влажности тундрового покрова по снимкам высокого разрешения подтверждается результатами верификации изменений $\rho_{кр}$, $\rho_{бик}$ и индекса NDVI (по данным спутников QuickBird и Ikonos) путем сопоставления с изменениями индекса NDWI, характеризующего влажность покрова (по данным спутников Landsat 7, 8). Показано, что параметр $\rho_{кр}$ менее чувствителен, однако имеет преимущество перед $\rho_{бик}$ и NDVI, поскольку однонаправленно меняется с изменением влажности для любых встречаемых типов поверхности – от обнаженного грунта до развитого напочвенного растительного покрова с любыми реальными значениями индекса NDVI.

Ключевые слова: влажность, космические снимки, коэффициенты отражения, тундровый почвенно-растительный покров, спектральные индексы.

Для цитирования: Корниенко С.Г. Информативность космических снимков сверхвысокого разрешения в задачах мониторинга влажности тундрового покрова // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 82–95. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art7>

Введение

Активизация опасных экзогенных геокриологических процессов (ОГП), таких как термокарст, термоэрозия, подтопление, заболачивание, морозное пучение, дефляция, солифлюкция в районах распространения многолетнемерзлых пород, как правило, связана с изменением условий теплообмена мерзлых грунтов с атмосферой при строительстве и эксплуатации промышленных и инфраструктурных объектов [1]. Изменение влажности грунтов и тундрового почвенно-растительного покрова (ПРП), обусловленное нарушением условий поверхностного и внутripочвенного стока,

относится к числу основных причин развития ОГП. Для проведения превентивных инженерно-геологических мероприятий, снижающих риски возникновения аварийных ситуаций, необходима информация об изменении состояния поверхности, включая изменение влажности ПРП и грунта. Для геотехнического мониторинга и крупномасштабного картографирования участков вероятной активизации опасных геокриологических процессов необходимая детальность съемки может быть обеспечена, в частности, космическими снимками сверхвысокого пространственного разрешения (КСВР) оптического диапазона.

В то же время информативность КСВР для оценки изменений влажности тундрового покрова, субстратов и грунтов изучена не в полной мере. В основном это связано с отсутствием достаточного количества экспериментальных данных, характеризующих связь спектральных характеристик поверхности тундрового ПРП с их влажностью и влажностью субстратов и грунтов. Особенность космических снимков сверхвысокого разрешения оптического диапазона заключается в том, что их спектральные каналы ограничиваются ближней инфракрасной (ИК) областью (длина волны $\lambda < 0,9$ мкм). В этой связи невозможно использование более чувствительных к содержанию влаги спектральных каналов средней и дальней (тепловой) ИК области, а также рассчитанных на их основе спектральных индексов, например, индекса NDWI (Normalize Difference Water Index) [2].

Возможность использования данных красной и ближней ИК области спектра для оценки содержания влаги в поверхностном покрове ранее была рассмотрена в работах [3–7]. В работе [3] на примере территории австралийского континента показана устойчивая связь между вариациями влажности почвы и индекса NDVI (Normalize Difference Vegetation Index), характеризующего содержание хлорофилла в покрове [8]:

$$NDVI = (r_{БИК} - r_{КР}) / (r_{БИК} + r_{КР}), \quad (1)$$

где $r_{КР}$ и $r_{БИК}$ – коэффициенты отражения в красной и ближней ИК области спектра, соответственно.

По результатам наземных наблюдений и съемок со спутников Landsat и Ikonos установлено, что в арктических тундрах индекс NDVI в определенной мере связан с

влажностью почвы [4]. На графике (рис. 1) по оси абсцисс слева направо обозначено расположение участков (Plot) наблюдений по мере увеличения влажности почвы. Несмотря на существенные различия абсолютных значений индекса, рассчитываемых по данным различных средств измерения, из графика видно, что общий тренд характеризует повышение индекса NDVI при увеличении влажности почвы. В то же время для аномально низких (участки Р6, Р7, Р12) и высоких (участки Р3, Р8, Р10) значений влажности и индекса NDVI эта закономерность не соблюдается явно. При повышении влажности живого мха сфагнума $r_{КР}$ уменьшается, а $r_{БИК}$ и, соответственно, NDVI растут [9]. Для некоторых типов тундрового напочвенного растительного покрова, а также песчаного грунта при повышении влажности субстрата и песка значения $r_{КР}$ снижаются, в то время как значения $r_{БИК}$ и NDVI могут повышаться или понижаться в зависимости от типа покрова [6]. Спектральные каналы КСВР с длиной волны менее 0,60 мкм (синяя, зеленая области) менее чувствительны к изменению влажности и их использование для этих целей менее перспективно [9, 10].

В целом, обобщение опубликованных материалов свидетельствует о принципиальной возможности использования каналов красной и ближней ИК области спектра для характеристики влажности тундрового ПРП. В то же время имеющихся экспериментальных данных пока недостаточно для разработки нормативно-методических рекомендаций использования космических снимков сверхвысокого разрешения для крупномасштабного (М 1:5 000) картографирования и мониторинга влажности тундрового покрова и, соответственно, прогнозирования ОГП.

Цель работы – оценка информативности изменений влажности тундрового КСВР красной и ближней ИК ПРП в арктических и субарктических области спектра для характеристики тундрах.

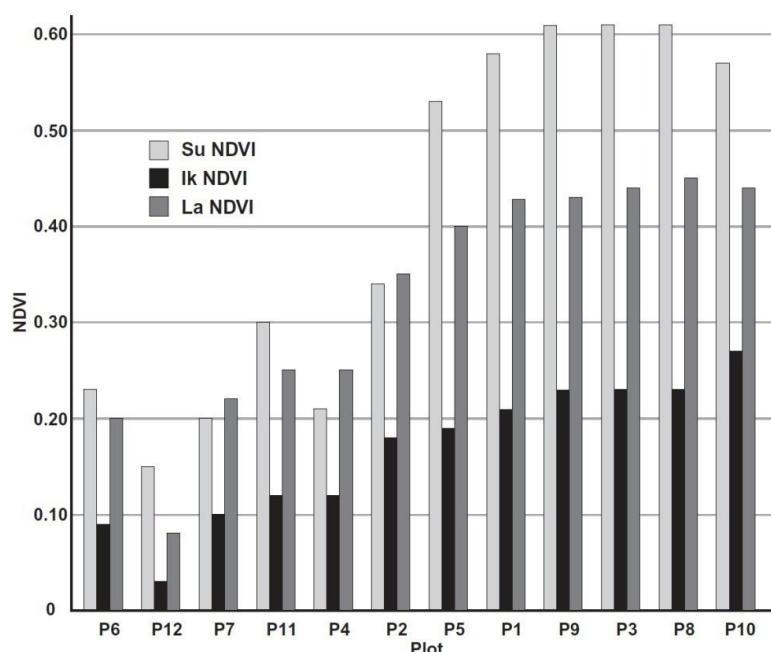


Рис. 1. Связь влажности почвы со значениями NDVI, рассчитанными по данным наземных измерений (Su) и со спутников Ikonos (Ik) и Landsat (La) [4]

Исходные данные, методика и объекты исследований

Для крупномасштабного (М 1:5 000) картографирования состояния ландшафта использовались мультиспектральные снимки спутников QuickBird и Ikonos. Для верифи-

кации результатов их применения дополнительно использовались мультиспектральные снимки со спутников Landsat. В табл. 1 приведены основные характеристики используемых в работе космических снимков и спектральных каналов.

Таблица 1

Используемые космические снимки и спектральные каналы

Космический аппарат	Дата съемки	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м
QuickBird	06.07.2003 г.	0,44–0,90 (панхроматический)	0,61
		0,63–0,69 (красный);	2,44
		0,76–0,90 (ближний ИК)	–
Ikonos	19.07.2013 г.	0,44–0,90 (панхроматический)	0,82
		0,64–0,72 (красный);	3,28
		0,77–0,88 (ближний ИК)	–
Landsat 7	06.07.2002 г.	0,63–0,69 (красный);	30,0
		0,77–0,90 (ближний ИК);	–
		1,55–1,75 (коротковолновый ИК)	–
Landsat 8	21.07.2013 г.	0,63–0,68 (красный);	30,0
		0,84–0,88 (ближний ИК);	–
		1,56–1,66 (коротковолновый ИК)	–

Анализ проводился на основе коэффициентов отражения по выбранным спектральным каналам, спектральному индексу NDVI, а также индексу NDWI, рассчитываемому по данным спутников Landsat 7, 8 [2]:

$$NDWI = (r_{\text{бик}} - r_{\text{кик}}) / (r_{\text{бик}} + r_{\text{кик}}), \quad (2)$$

где $r_{\text{кик}}$ – коэффициент отражения в коротковолновой ИК области спектра (см. табл. 1).

Для оценки изменений (мониторинга) состояния ландшафтов по разновременным космическим снимкам на этапе предварительной их обработки, кроме стандартных процедур калибровки, геометрической коррекции и пространственного совмещения изображений, проводилась их относительная радиометрическая коррекция. Необходимость этого этапа обусловлена тем, что различия спектральных изображений, полученных различными космическими системами в разное время, могут быть связаны не только с изменением состояния ландшафта, но и с другими, системными или случайными факторами. В первую очередь к ним относят различия пропускания атмосферы, времени съемки, калибровочных характеристик. Как правило, эти различия характеризуются линейными изменениями спектральных изображений, что выражается в разнице контрастов и средних значений параметров. Наиболее распространенным способом устранения подобных различий при анализе разновременных мультиспектральных изображений является их относительная радиометрическая коррекция по участкам ненарушенного состояния (псевдо-инвариантным областям) [11, 12]. В подобных методах один

спектральный снимок (изображение) принимается как опорный, а все остальные корректируются (нормализуются) до вида, максимально приближенного к опорному снимку, в частности, с использованием коэффициентов уравнения линейной регрессии [5, 6]. В данном случае расчет коэффициентов уравнения регрессии проводился по участкам ненарушенного (фоновому) состоянию ландшафтов с различными типами покрова, находящихся на значительном удалении от промышленных и инфраструктурных объектов.

Изменения параметров определялись стандартным методом, по разнице значений более поздней и более ранней даты съемки. Участки аномальных изменений параметров определялись путем маскирования значений, относящихся к участкам изменений ненарушенного фоновому состоянию ландшафта (с доверительным интервалом 99%) [7].

Границы водных поверхностей определялись по изображениям панхроматических каналов спутников QuickBird и Ikonos также с проведением этапа относительной радиометрической коррекции. Обработка и анализ данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) проводились с помощью программ ENVI 5.3 и MS Excel. В работе использовалась инженерно-геокриологическая карта (ЮЖНИИГИПРОГАЗ, 2012 г.), характеризующая типы местности с разной степенью дренирования.

Анализ данных ДЗЗ проводился на отдельных участках территории строительства завода по сжижению природного газа (СПГ) на Южно-Тамбейском газоконденсатном месторождении (ГКМ) в районе поселка Сабетта.

Строительство завода и объектов инфраструктуры было начато в 2012 г., а в 2017 г. состоялся запуск первой очереди производства сжиженного газа. Само месторождение расположено на восточном берегу полуострова Ямал, на границе арктической и субарктической зон. Район характеризуется сплошным распространением льдистых и малольдистых мерзлых пород, неравномерно дренированными, обводненными и заболоченными плоскими участками [13].

Грунты преимущественно твердомерзлые, представлены супесями, песками, суглинками, глинами и торфом. Микрорельеф мелкопочковатый, пологоволнистый, полигональный. В растительности доминирует низкорослый мохово-лишайниковый покров (2–3 см), реже встречаются травы и кустарники. Растительный покров не сплошной, разорван пятнами минерального грунта. На более влажных суглинистых отложениях преобладают мхи, на хорошо дренированных песчаных грунтах – лишайники.

Характеристика распределений $\rho_{\text{кр}}$, $\rho_{\text{бик}}$ и NDVI на участках различной степени дренирования поверхности

На рис. 2 приведены распределения параметров $\rho_{\text{кр}}$ (а), $\rho_{\text{бик}}$ (б) и индекса NDVI (в), построенные по данным спутника QuickBird в сопоставлении с картой инженерно-геокриологической съемки (г), характеризующей степень дренирования поверхности участка строительства взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэропорта пос. Сабетта. Использование данных QuickBird обусловлено необходимостью характеристики состояния участка до начала строительства ВПП. Распределения

параметров $\rho_{\text{кр}}$, $\rho_{\text{бик}}$ и NDVI даны с доверительным интервалом в 99% в 10-ти градациях цвета.

В соответствии с легендой инженерно-геокриологической карты степень дренирования типов местности (мезорельефа) снижается с 1-ого по 5-ый тип, а 6-ой тип отнесен к дренированным морским террасам. По остальным типам (7–10) сведения о характере увлажнения поверхности не представлены. В то же время первые шесть типов местности занимают 92,8% площади (с исключением водоемов) анализируемого участка взлетно-посадочной полосы, что можно считать достаточно представительной выборкой.

На рис. 3 приведена диаграмма распределения средних значений параметров $\rho_{\text{кр}}$, $\rho_{\text{бик}}$ и индекса NDVI в границах типов местности в зависимости от степени дренирования их поверхности. Номер типа местности соответствует легенде инженерно-геокриологической карты, представленной на рис. 2. Столбцы, характеризующие значения параметров для типов местности с отсутствием сведений о влажности (7–10) на рис. 3, приведены менее контрастно. Сопоставление данных дистанционного зондирования с типами местности (см. рис. 2 и 3) показывает, что в данном случае дренированные поверхности 1, 6) характеризуются более высокими значениями $\rho_{\text{кр}}$, $\rho_{\text{бик}}$, а более низкие значения этих параметров приурочены к участкам более влажных поверхностей (3, 4, 5). Анализируемая территория в среднем характеризуется относительно низкими ($< 0,3$) значениями индекса NDVI и некоторым их снижением при повышении влажности (за исключением 5-ого типа местности).

Этот факт может свидетельствовать о значительной доле открытых грунтов и объясняет снижение $\rho_{\text{БИК}}$ при повышении влажности, что соответствует результатам лабораторных экспериментов

на некоторых образцах тундрового покрова [6]. Значения $\rho_{\text{КР}}$ также снижаются по мере повышения влажности грунтов, но в меньшей степени по сравнению с $\rho_{\text{БИК}}$.

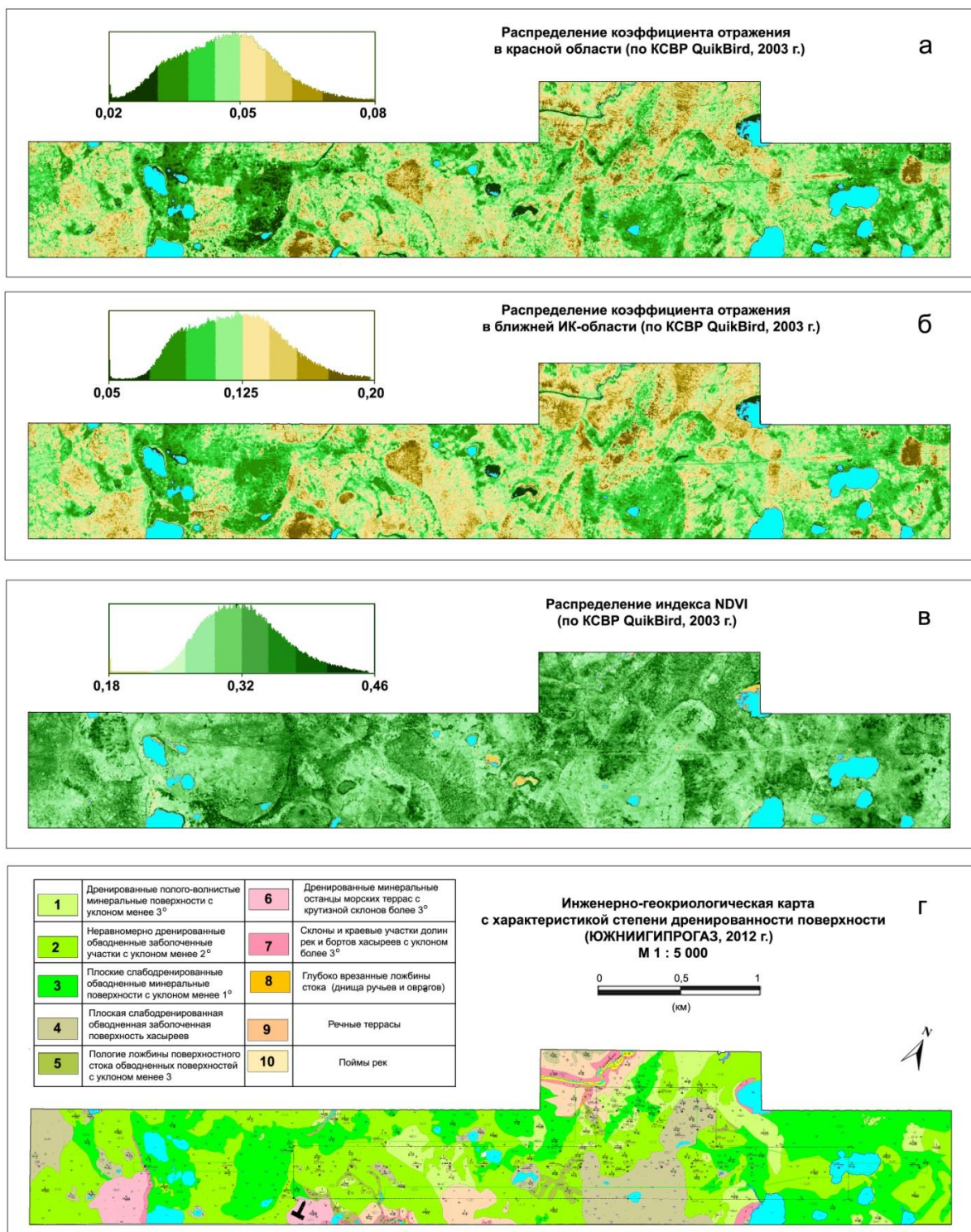


Рис. 2. Распределения $\rho_{\text{КР}}$ (а), $\rho_{\text{БИК}}$ (б) и индекса NDVI (в) в сопоставлении с картой инженерно-геокриологической съемки (г) участка строительства ВПП пос. Сабетта

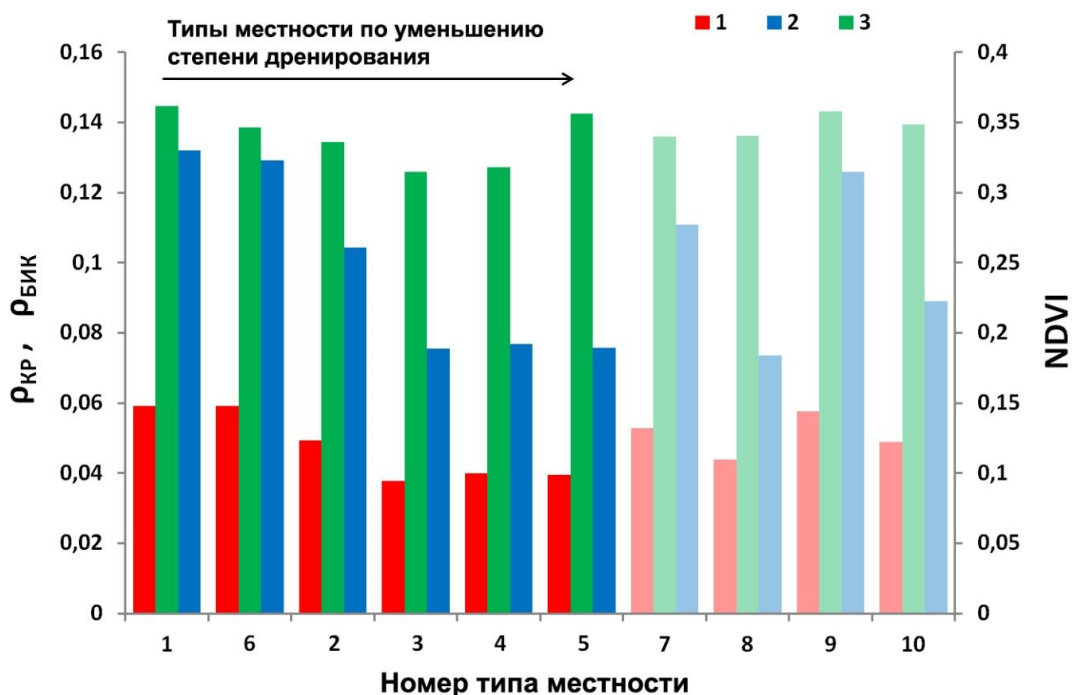


Рис. 3. Средние значения $\rho_{кр}$ (1), $\rho_{бик}$ (2) и индекса NDVI (3) в границах типов местности с разной степенью дренирования поверхности (спутник QuickBird, район строительства ВПП пос. Сабетта)

Речные террасы (тип 9), склоны, краевые участки долин рек и борта хасыреев (тип 7), занимающие 4,8% и 1,9% площади, соответственно, характеризуются относительно высокими значениями $\rho_{кр}$, $\rho_{бик}$ и NDVI, на уровне дренированных поверхностей (типы 1 и 6). Ложбины стока (тип 8) и поймы рек (тип 10) занимают десятые доли процента по площади и приблизительно соответствуют значениям параметров $\rho_{кр}$, $\rho_{бик}$ и NDVI для неравномерно дренированных (тип 2) и слабодренированных (тип 3) поверхностей.

При относительно низких значениях NDVI ($< 0,30$) вариации этого параметра неоднозначно связаны с влажностью почвенно-растительного покрова, что подтверждается результатами ранее опубликованных исследований [4, 6]. В то же время вариации $\rho_{кр}$ устойчиво связаны с влажностью поверхности при любых значениях индекса NDVI, хотя параметр $\rho_{кр}$

менее чувствителен к изменениям влажности по сравнению с $\rho_{бик}$ и NDVI. Ранее было показано, что, теоретически, по параметру $\rho_{кр}$ (КСВР) изменения относительной влажности тундрового покрова могут быть выявлены на уровне 1% [6].

В целом, полученные результаты могут служить основанием для разработки методики контроля (мониторинга) влажности тундрового напочвенного и растительного покрова с использованием параметров $\rho_{кр}$, $\rho_{бик}$ и NDVI.

Верификация результатов применения КСВР

Сложность верификации результатов применения КСВР для контроля влажности поверхности связана с отсутствием или невозможностью получения каких-либо достоверных данных наземных наблюдений, характеризующих изменение влажности ПРП с необходимой детальностью, соизмеримой с данными космической съемки.

Альтернативный подход – использование близких по датам съемки данных более низкого пространственного разрешения со спутников, имеющих спектральные каналы и индексы, характеризующие вариации влажности покрова, в частности, индекс NDWI [2].

Подтверждением системной связи вариаций параметров NDVI, $\rho_{\text{кр}}$ и $\rho_{\text{бик}}$ с изменениями влажности ПРП могут служить результаты сравнений с изменением параметра NDWI, рассчитываемого по данным спутника Landsat. В данном случае было проведено сопоставление аномальных изменений параметра NDWI по данным съемки со спутников Landsat 7, 8 (2002 и 2013 гг.) с изменением NDVI, $\rho_{\text{кр}}$ и $\rho_{\text{бик}}$ по снимкам спутников QuickBird (2003 г.) и Ikonos (2013 г.) на различных участках

территории строительства завода СПГ. Фрагмент (а) на рис. 4 иллюстрирует область повышения индекса NDWI за период с 2002 по 2013 гг. вблизи дороги по данным съемки со спутников Landsat 7, 8. На фрагменте (б) показана область аномального повышения индекса NDVI, рассчитанного по снимкам QuickBird и Ikonos. Сравнение фрагментов показывает, что область повышения влажности, выделенная по разности изображений NDWI, практически полностью соответствует области повышения NDVI. В отличие от участка строительства ВПП данная территория характеризуется более развитым сплошным напочвенным растительным покровом и при повышении влажности субстрата увеличивается объем его зеленой массы, что характеризуется относительно высокими значениями индекса NDVI ($> 0,5$) [7].

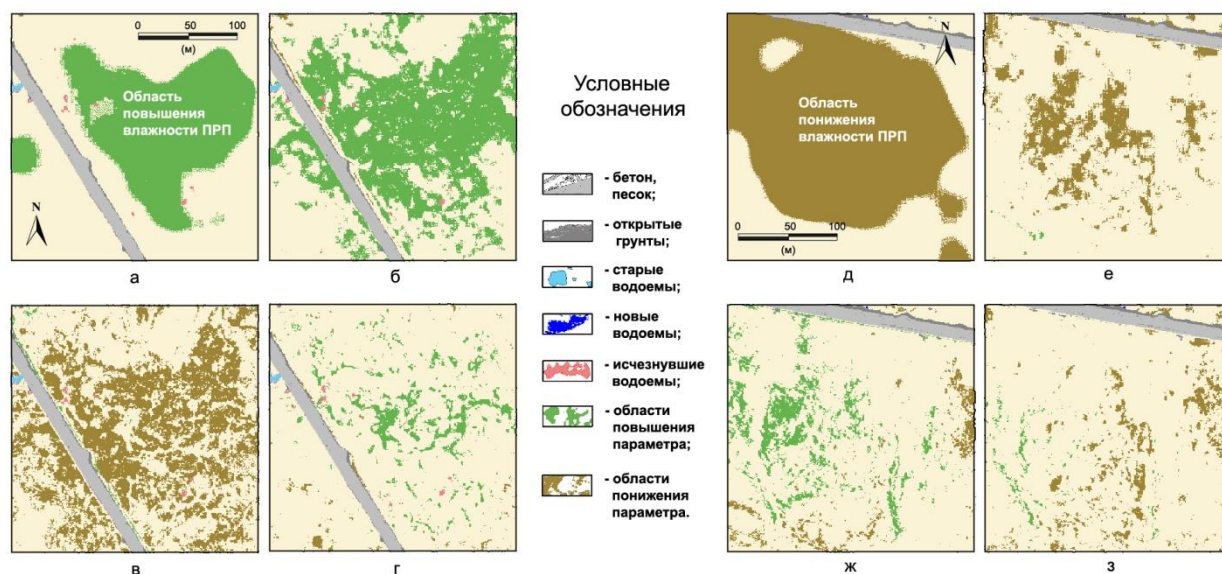


Рис. 4. Связь аномальных изменений индексов NDWI (а, д), NDVI (б, е) и параметров $\rho_{\text{кр}}$ (в, ж), $\rho_{\text{бик}}$ (г, з) с повышением (а, б, в, г) и снижением (д, е, ж, з) влажности ПРП

Фрагменты нижнего ряда иллюстрируют обширное понижение значений параметра $\rho_{\text{кр}}$ (см. рис. 4, в) и незначительное повышение $\rho_{\text{бик}}$ (см. рис. 4, г), вследствие чего и фиксируется рост параметра NDVI (см. рис. 4, б). Известно, что увеличение

зеленой массы и содержание хлорофилла в растительном покрове, связанное с повышением влажности субстрата, характеризуется повышением $\rho_{\text{бик}}$ в то время как понижение $\rho_{\text{кр}}$ в большей степени связано с повышением влажности поверхности.

В подобных случаях оба параметра характеризуют процесс повышения влажности покрова. В то же время, как видно из фрагментов (см. рис. 4, в, г), пространственное распределение зон повышения $r_{\text{БИК}}$ (зеленый тон) приурочены к участкам без изменения $r_{\text{КР}}$ (желтый тон). Подобный факт может быть объяснен наличием в аномальной области двух типов растительности, из которых только один при повышении влажности субстрата увеличивает объем зеленой массы (хлорофилла).

Пример, характеризующий понижение влажности ПРП на соседнем участке, приведен на рис. 4 (д, е, ж, з). Здесь наблюдается обратная картина, соответствующая процессу дренирования грунтов. Область понижения влажности по параметру NDWI (см. рис. 4, д) соответствует области понижения параметра NDVI (см. рис. 4, е). При этом отмечается преимущественное повышение $r_{\text{КР}}$ (см. рис. 4, ж) и незначительное понижение $r_{\text{БИК}}$ (см. рис. 4, з).

Оба примера (см. рис. 4) иллюстрируют ситуацию, когда при изменении влажности покрова изменение индекса NDVI пространственно в большей степени связано с изменением $r_{\text{КР}}$, чем с $r_{\text{БИК}}$, что в данном случае свидетельствует о более высокой информативности параметра $r_{\text{КР}}$ для оценки изменений влажности.

Для некоторых участков аномальное изменение параметров $r_{\text{КР}}$, $r_{\text{БИК}}$ и NDVI может быть приурочено к зонам изменения гидрологической ситуации, а именно к участкам изменения площади водоемов, что может быть косвенным подтверждением связи изменений этих параметров с

изменениями влажности тундрового ПРП. На рис. 5 в качестве примера приведен фрагмент карты изменения состояния водных объектов и параметра $r_{\text{КР}}$ на участке, соседнем с участками, рассмотренными выше (см. рис. 4).

Карта (см. рис. 5) построена по данным спутников QuickBird (2003 г.) и Ikonos (2013 г.). Строительство дорог на этом участке проходило в 2011–2012 гг. Увеличение площади водной поверхности в русле реки в южной части фрагмента (см. рис. 5) и ее уменьшение в северной части свидетельствуют о том, что пропускная способность коллектора под дорогой не соответствует существовавшим естественным условиям поверхностного стока по рельефу (с юга на север). Как следствие, повышение уровня воды в реке приводит к задержке стока и переувлажнению грунтов на прибрежных участках. Обратная картина (дренирование грунтов) может наблюдаться при снижении интенсивности водотока. В южной части преимущественно отмечается понижение значений $r_{\text{КР}}$, что может быть связано с повышением влажности поверхностного покрова вблизи русла реки, а в северной – повышение значений $r_{\text{КР}}$ (понижение влажности). На участках повышения влажности ПРП вблизи дороги наиболее вероятна активизация опасных геокриологических процессов (отмечено красными окружностями). Дренирование поверхности приводит к снижению объемов растительного и почвенного покрова, ослаблению его скрепляющей и теплозащитной роли и, как следствие, к активизации дефляции, выветривания и обнажению поверхностного слоя грунтов.

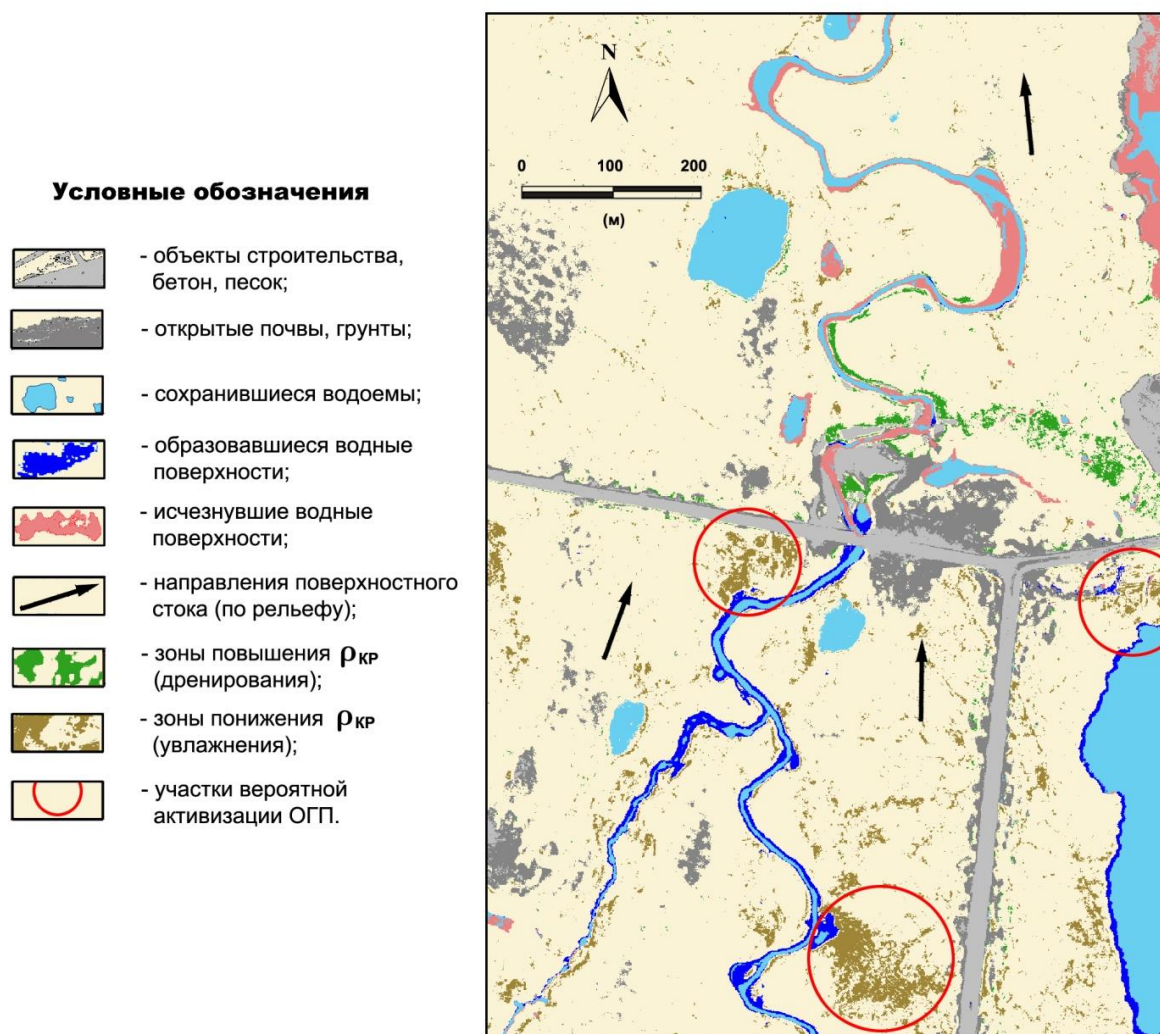


Рис. 5. Фрагмент карты изменения состояния водных объектов, параметра $\rho_{кр}$ и участков вероятной активизации ОГП в районе строительства завода СПГ на Южно-Тамбейском ГКМ (по КСВР QuickBird, 2003 г., Ikonos, 2013 г.)

Заключение

В целом, полученные результаты подтверждают возможность оценки изменений влажности тундрового почвенно-растительного покрова по изменению параметров $\rho_{кр}$, $\rho_{бик}$ и индекса NDVI, рассчитываемых, в том числе, по космическим снимкам сверхвысокого разрешения. Сравнительный анализ информативности спектральных каналов КСВР, проведенный в границах типов местности с разной степенью дренирования, показал, что параметр $\rho_{кр}$ менее чувствителен к изменениям влажности

поверхности по сравнению с $\rho_{бик}$ и NDVI. В то же время он имеет преимущество, поскольку, как отмечалось ранее [6], в отличие от них, параметр $\rho_{кр}$ однонаправленно меняется с изменением влажности для любых типов поверхности – от обнаженного грунта до сплошного тундрового напочвенного растительного покрова (мертвого и живого) с любыми реальными значениями индекса NDVI, что и подтверждается полученными результатами. Повышение влажности поверхности всегда характеризуется снижением значений $\rho_{кр}$.

Достоверность выявления участков с изменением влажности может быть повышена при комплексном анализе нескольких параметров, в том числе $\rho_{\text{кр}}$, $\rho_{\text{бик}}$ и индекса NDVI [7], а также при сопоставлении с другими геоиндикаторами, в частности, с гидрологическим индикатором. Примером может служить приведенная в работе ситуация, когда изменение параметра $\rho_{\text{кр}}$ на участках суши приурочено к изменению площади водной поверхности в русле реки после строительства дорожного полотна.

Накопленный опыт в данном направлении исследований показывает, что использование мультиспектральных космических снимков сверхвысокого разрешения в задачах оценки изменений влажности ПРП позволяет существенно расширить возможности геоэкологического и геотехнического мониторинга, а также прогнозирования развития ОГП в районах строительства и функционирования промышленных и инфраструктурных объектов в криолитозоне.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли», № AAAA-A19-119021590079-6).

Литература

1. Пендин В.В., Ганова С.Д. Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне. М.: ОАО «ПНИИИС», 2009. 236 с.
2. Gao B. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 58, No 3. P. 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
3. Chen T., De Jeu R.A.M., Liu Y.Y., Van der Werf G.R., Dolman A.J. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 140. P. 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.022>
4. Laidler G.J., Treitz P.M., Atkinson D.M. Remote sensing of arctic vegetation: Relations between the NDVI, spatial resolution and vegetation cover on Boothia Peninsula, Nunavut // Arctic. 2008. Vol. 61, No. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.14430/arctic2>
5. Корниенко С.Г., Якубсон К.И. Оценка изменений влажности почвенно-растительного покрова в криолитозоне по данным космической съемки сверхвысокого пространственного разрешения // Криосфера Земли. 2016. Т. XX, № 3. С. 113–120. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3\(113-120\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3(113-120))
6. Корниенко С.Г. Вариации коэффициентов отражения в красной, ближней инфракрасной области спектра и индекса NDVI образцов тундровой растительности в зависимости от влажности субстратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 225–234. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-225-234>
7. Корниенко С.Г. Выявление изменений влажности тундрового почвенно-растительного покрова по данным мультиспектральной космической съемки (на примере территории строительства завода по сжижению природного газа на полуострове Ямал) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 110–119. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-110-119>

8. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
9. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 271 с.
10. *Hoffer R.M., Johannsen C.J.* Ecological potential in spectral signature analysis // Remote Sensing in Ecology / Ed. by P.L. Johnson. Athens: University Georgia Press. 1969. P. 1–16.
11. *Schott J.R., Salvaggio C., Vochok W.J.* Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features // Remote Sensing of Environment 1988. Vol. 26, No. 1. P. 1–14. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90116-2)
12. *Canty M.J., Nielsen A.A.* Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112, No.3. P. 1025–1036. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.013>
13. *Ловчук В.В., Никитина Н.Ф., Кондратенко С.Е., Кондратьева Т.А.* Отчет по инженерно-геологической съемке Южно-Тамбейской структуры м-ба 1:50 000 на площади 1005 км² в 1981–1984 гг. В 2-х томах. Т. 1. Тюмень, 1984. 293 с.

Informative value of ultra-high resolution satellite images for monitoring the moisture content of the tundra cover

S.G. Kornienko

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Abstract. The article substantiates the fundamental possibility of using multispectral ultra-high spatial resolution satellite images for monitoring the moisture content of the tundra. The results of the analysis of spectral images from the QuickBird satellite in the area of the construction of the runway in the village Sabetta (the Yamal Peninsula) indicate an obvious relationship between the reflectance factors in the red (ρ_{RED}) and near infrared (ρ_{NIR}) regions with the types of terrain of varying degrees of drainage. The possibility of assessing changes in the moisture content of the tundra cover using high-resolution images is confirmed by the results of verifying the changes in ρ_{RED} , ρ_{NIR} and the NDVI index (according to the QuickBird and Ikonos satellites) by comparing with the changes in the NDWI index, which characterizes the cover moisture (according to the Landsat 7, 8 satellites). It is shown that the parameter ρ_{RED} is less sensitive, but it has an advantage over ρ_{NIR} and NDVI, since it changes unidirectionally with the changes in moisture for any encountered types of surface – from bare ground to developed ground vegetation cover with any real values of the NDVI index.

Keywords: water content, space images, reflectance factors, tundra land cover, spectral indices.

Citation: Kornienko S.G. Informative value of ultra-high resolution satellite images for monitoring the moisture content of the tundra cover // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 82–95. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art7> (In Russ.).

References

1. Pendin V.V., Ganova S.D. Geoecological monitoring of the territories of gas transportation facilities in the permafrost zone. Moscow: PNIIS JSC, 2009. 236 p. (In Russ.).
2. Gao B. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 58, No. 3. P. 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
3. Chen T., De Jeu R.A.M., Liu Y.Y., Van der Werf G.R., Dolman A.J. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 140. P. 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.022>
4. Laidler G.J., Treitz P.M., Atkinson D.M. Remote sensing of arctic vegetation: Relations between the NDVI, spatial resolution and vegetation cover on Boothia Peninsula, Nunavut // Arctic. 2008. Vol. 61, No. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.14430/arctic2>
5. Kornienko S.G., Yakubson K.I. Assessment of changes in moisture of soil-vegetation cover in permafrost areas: Evidence from satellite imagery of very high resolution // Kriosfera Zemli. 2016. Vol. XX, No. 3. P. 113–120. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3\(113-120\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3(113-120)) (In Russ.).
6. Kornienko S.G. Variations of red and near-infrared reflectance and NDVI of tundra vegetation as a function of substrate moisture // Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2017. Vol. 14, No. 3. P. 225–234. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-225-234> (In Russ.).

7. *Kornienko S.G.* Water content variations in the tundra land cover: evidence from multispectral satellite imagery (a case study of a liquefied natural gas plant construction site, Yamal Peninsula) // *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018. Vol. 15, No. 5. P. 110–119. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-110-119> (In Russ.).
8. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
9. *Krinov E.L.* The spectral reflectivity of natural formations. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1947. 271 p. (In Russ.).
10. *Hoffer R.M., Johannsen C.J.* Ecological potential in spectral signature analysis // *Remote Sensing in Ecology* / Ed. by P.L. Johnson. Athens: University of Georgia Press. 1969. P. 1–16.
11. *Schott J.R., Salvaggio C., Vochok W.J.* Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features // *Remote Sensing of Environment* 1988. Vol. 26, No. 1. P. 1–14. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90116-2)
12. *Canty M.J., Nielsen A.A.* Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, No 3. P. 1025–1036. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.013>
13. *Lovchuk V.V., Nikitina N.F., Kondratenko C.T., Kondrat'eva T.A.* Report on engineering-geological survey of the South Tambey structure, scale 1:50 000 on the area of 1005 km² in 1981–1984. In 2 vols. Tyumen, 1984. Vol. 1. 293 p. (In Russ.).

Анализ использования индикаторов оценки энергетической безопасности в научных публикациях

Б.Н. Чигарев

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: bchigarev@ipng.ru

Аннотация. В статье анализируется общая картина использования пяти индикаторов оценки энергетической безопасности: World Energy Trilemma Index, International Index of Energy Security Risk, SES, Sustainable Energy Security Index, Global Energy Architecture Performance, The IEA Model of Short-term Energy Security, предложенных международными энергетическими агентствами в научных исследованиях по теме «энергетическая безопасность». Отмечается их редкое использование в научных публикациях и даже в текстах отчетов ряда агентств. В качестве иллюстрации на примере Китая показано, что использование индикаторов в сочетании с регулярными отчетами Международного энергетического агентства может дать только общую картину энергетической безопасности страны, но не позволяет проводить более глубокий анализ ввиду отсутствия доступа к исходным данным. Приводится краткий библиометрический анализ публикаций по вопросам индикаторов энергетической безопасности. Показано, что библиометрические показатели могут являться гибкими индикаторами экспертного отношения к изучаемой теме и выявлять перспективные направления исследований по проблемам энергетической безопасности.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, индексы энергетической безопасности, Китай, библиометрические индикаторы, библиографические и реферативные базы данных.

Для цитирования: Чигарев Б.Н. Анализ использования индикаторов оценки энергетической безопасности в научных публикациях // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 96–110. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art8>

Вопросы энергетической безопасности на протяжении длительного времени рассматриваются как один из ключевых факторов национальной безопасности. Индикаторы, оценивающие различные аспекты энергетической безопасности, призваны сопоставить ситуацию с энергетической безопасностью в разных странах, подчеркнуть сильные и слабые стороны, показать тренды изменения данных индикаторов.

Согласно работам [1–4] наибольшее применение нашли следующие пять индикаторов энергетической безопасности: World Energy Trilemma Index [5], SES,

Sustainable Energy Security Index [6], International Index of Energy Security Risk [7], Global Energy Architecture Performance [8], The IEA Model of Short-term Energy Security [9].

Целью данной работы является анализ использования перечисленных индикаторов в исследовательских работах за 2015–2020 гг., обсуждение возможностей применения библиометрических данных для оценки экспертного мнения по вопросам использования индикаторов, оценивающих состояние энергетической безопасности, и выявления перспективных тем исследований.

Результаты запросов к реферативной базе The Lens при фильтрации по теме исследований «Field of Study: Energy Security» показывают, что издательство Elsevier публикует наибольшее число научных статей по теме «энергетическая безопасность». Поэтому для более детального анализа использования индексов, характеризующих энергетическую безопасность в научных публикациях, целесообразно воспользоваться библиографической базой Scopus, которая поддерживается указанным издательством.

Упоминание полного названия индексов в заголовках, аннотациях и ключевых словах встречается крайне редко; например, запрос: TITLE-ABS-KEY («The IEA Model of Short-term Energy Security») AND PUBYEAR > 1999 дает только 69 результатов, а сужение временного диапазона до интервала 2015–2020 гг. вообще не дает результатов поиска.

При этом сама тема энергетической безопасности за тот же период представлена 4352 публикациями, в которых термин «Energy Security» находится в заголовках, аннотациях или ключевых словах. Если рассматривать встречаемость данного термина во всех полях базы Scopus, то таких документов будет 15852.

Поэтому в дальнейшем велся поиск документов, опубликованных в 2015–2020 гг., название индекса в которых встречалось в любом поле базы данных; например, запрос: ALL («The IEA Model of Short-term Energy Security») AND PUBYEAR > 2014 выдает уже 53 результата.

Для пяти индексов получаем, соответственно, следующее количество найденных документов:

- 126 → World Energy Trilemma Index;

- 32 → SES. Sustainable Energy Security Index;
- 17 → International Index of Energy Security Risk;
- 59 → Global Energy Architecture Performance;
- 53 → The IEA Model of Short-term Energy Security.

Частота отнесения документов, найденных в базе Scopus, к предметной категории (поле «Subject») для указанных индексов* представлена в табл. 1.

Таким образом, полное упоминание индексов энергетической безопасности встречается достаточно редко в сравнении с результатами более широких запросов; например, запрос ALL «energy security» AND (assessment OR index) AND PUBYEAR > 2014 дает 12541 результатов, а тот же запрос к полям: название статьи, краткое описание, ключевые слова – 738 документов. Поэтому научные публикации, прямо ассоциированные с названиями индексов энергетической безопасности, позволяют получить ограниченный объем данных, характеризующих энергетическую безопасность той или иной страны, и использование отчетов, предоставляемых аналитическими агентствами, становится неизбежным. Результаты, представленные в таких отчетах, будут использованы во второй части данной публикации при рассмотрении вопросов энергетической безопасности Китая.

* По данной ссылке приведен список всех предметных областей в Scopus, позволяющий строить продвинутые запросы к базе Scopus, используя название предметной области в качестве фильтра: https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/15181/supporthub/scopus/

Таблица 1

Частота отнесения найденного в базе Scopus документа к предметной категории (поле «Subject») для 5 рассматриваемых индексов, названия которых используются в запросе к библиографической базе

	1_t	2_t	3_t	4_t	5_t	6_t	7_t	8_t
1_i	63	44	40	39	23	14	12	11
2_i	20	19	11	7	4	3	3	3
3_i	9	9	6	5	9	4	1	0
4_i	27	23	16	15	0	8	3	3
5_i	28	22	16	14	6	9	2	2

Примечания:

Обозначение строк – название индекса (запрос к базе Scopus):

- 1_i → World Energy Trilemma Index
- 2_i → SES. Sustainable Energy Security Index
- 3_i → International Index of Energy Security Risk
- 4_i → Global Energy Architecture Performance
- 5_i → The IEA Model of Short-term Energy Security

Обозначение столбцов – поле «Subject» в базе Scopus:

- 1_t → Energy
- 2_t → Environmental Science
- 3_t → Engineering
- 4_t → Social Sciences
- 5_t → Business, Management and Accounting
- 6_t → Economics, Econometrics and Finance
- 7_t → Mathematics
- 8_t → Decision Sciences

Названия предметных областей, к которым система Scopus относит документы, найденные по запросам, основанным на названиях индексов, хорошо отражают различные стороны темы энергетической безопасности: энергетика; окружающая среда; инженерия; социальные вопросы; бизнес, управление и учет; экономика и финансы; математика; принятие решений.

Аффилиация публикаций со странами для рассматриваемых индексов (страна → число публикаций) дает следующие результаты:

World Energy Trilemma Index: China → 24; United Kingdom → 21; United States → 9; Germany → 8; Spain → 8; Netherlands → 7; Australia → 6; India → 6; Italy → 6; Pakistan → 6; Turkey → 6; France → 5; Hong Kong →

5; Lithuania → 5; Ukraine → 5; Colombia → 4; Japan → 4; Singapore → 4; South Korea → 4; Brazil → 3; Switzerland → 3.

SES. Sustainable Energy Security Index: China → 7; India → 4; Austria → 3; Germany → 3; United States → 3; Czech Republic → 2; Finland → 2; France → 2; Greece → 2; Lithuania → 2; Malaysia → 2; Norway → 2; Australia → 1; Bangladesh → 1; Iran → 1; Lebanon → 1; Mauritius → 1; Netherlands → 1; New Zealand → 1; Pakistan → 1; Russian Federation → 1.

International Index of Energy Security Risk: India → 3; Singapore → 3; China → 2; Australia → 1; Canada → 1; Czech Republic → 1; France → 1; Hungary → 1; Italy → 1; Lithuania → 1; Norway → 1; Saudi Arabia → 1; Serbia → 1; Turkey → 1; Ukraine → 1; United States → 1; Uruguay → 1.

Global Energy Architecture Performance:

United States → 8; China → 5; Greece → 5; Lithuania → 4; Turkey → 4; Brazil → 3; India → 3; Indonesia → 3; Norway → 3; United Kingdom → 3; Belgium → 2; France → 2; Netherlands → 2; Russian Federation → 2; Singapore → 2; South Africa → 2; South Korea → 2; Switzerland → 2; Thailand → 2; Argentina → 1; Australia → 1.

The IEA Model of Short-term Energy Security: Germany → 6; United Kingdom → 6; India → 5; Australia → 4; Austria → 3; China → 3; Serbia → 3; Singapore → 3; United States → 3; Brazil → 2; Indonesia → 2; Italy → 2; Netherlands → 2; Slovakia → 2; Spain → 2; Sweden → 2; Switzerland → 2; Turkey → 2; Azerbaijan → 1; Canada → 1; Russian Federation → 1; France → 1.

Если рассматривать первые 3 страны, с которыми аффилированы авторы тех публикаций, где упоминается использование соответствующего индекса, то Китай входит в четыре списка из пяти. Это еще один аргумент для выбора Китая для дальнейшего, более детального исследования возможности использования данных, публикуемых агентствами, поддерживающими тот или иной индекс, для описания состояния энергетической безопасности рассматриваемой страны.

Тематика публикаций, в которых используется упоминание полного названия хотя бы одного индекса, характеризующего энергетическую безопасность, описывается следующими терминами (термин → встречаемость): energy security → 61; (economic) sustainable development → 55; (environmental) (energy) sustainability → 53; renewable

energie(s) (resources) → 41; energy policy → 36; energy efficiency → 30; energy market (resource) → 25; decision making → 17; energy conservation → 17; energy utilization → 17; energy transition(s) → 17; economics → 15; energy use → 15; fossil fuels → 15; climate change → 13; performance assessment → 11; China → 10; economic and social effects → 10; energy planning → 10; greenhouse gases → 10; alternative energy → 9; index method → 9; investments → 9; power markets → 9; developing countries → 8. В скобках приводится вариант термина, например, «экономическое устойчивое развитие» или «устойчивое развитие», здесь первый термин является частным случаем второго. Из приведенного списка видно, что доминирующими темами в рассматриваемых публикациях являются: энергетическая безопасность, устойчивое развитие, возобновляемая энергетика, энергетическая политика, энергоэффективность и энергетический рынок. Полученные данные неплохо согласуются с определениями индексов энергетической безопасности, детально описанными в работах [1–4].

Достаточно редкая встречаемость рассматриваемых индексов в \текстах научных публикаций сужает возможность их использования в качестве ключевых терминов при сборе информации для более детального изучения различных сторон энергетической безопасности конкретных стран. При сборе информации встречаемость терминов в заголовках, аннотациях и ключевых словах дает более релевантную рассматриваемой теме выборку публикаций.

Поэтому целесообразно сопоставить полученный выше перечень ключевых терминов с результатами более широких запросов, касающихся оценок энергетической безопасности и устойчивой энергетики (доминирующие темы в публикациях, связанных с рассматриваемыми индексами):

– 963 результата поиска документов: TITLE-ABS-KEY («energy security» AND (assessment OR indicator OR index OR estimation)) AND PUBYEAR > 2014;

– 1,035 результатов поиска документов: TITLE-ABS-KEY («Sustainable energy» AND (assessment OR indicator OR index OR estimation)) AND PUBYEAR > 2014;

– 1,936 результатов поиска документов: TITLE-ABS-KEY ((«Sustainable energy» OR «energy security») AND (assessment OR indicator OR index OR estimation)) AND PUBYEAR > 2014.

25 наиболее встречаемых терминов в 1936 публикациях, посвященных оценкам энергетической безопасности и устойчивой энергетики, размещенных в базе Scopus за 2015–2020 гг.: renewable energy(s) (resources) → 815; energy security → 718; sustainable development → 447; energy policy → 397; energy efficiency → 268; sustainable energy → 241; climate change → 235; energy conservation → 215; alternative energy → 193; energy utilization → 191; greenhouse gases → 161; economics → 160; decision making → 158; carbon dioxide → 149; environmental impact → 145; fossil fuels → 144; biomass → 128; risk assessment → 122; investments → 118; gas emissions → 107; wind power → 101; economic and social effects → 95; electricity generation → 95; solar energy → 94; China → 91. В тематике публикаций доминируют вопросы возобновляемой (альтернативной энергетики), включая конкретные их виды: энергия ветра, солнечная энергетика,

биомассы. Вопросы изменения климата и экологии также хорошо представлены. Уделяется большое внимание эффективности энергетики, оценки рисков, инвестиций, вопросам принятия решений. Широкое использование терминов: энергетическая безопасность, устойчивая энергетика, энергетическая политика – указывает на соответствие публикаций исследуемой теме.

При этом распределение по областям исследований является достаточно устойчивым. Например, ограничивая поиск Китаем (страной аффилиации), получаем следующее распределение (область исследований → число публикаций): Energy → 96; Environmental Science → 94; Engineering → 42; Social Sciences → 39; Business, Management and Accounting → 18; Agricultural and Biological Sciences → 14; Earth and Planetary Sciences → 13; Economics, Econometrics and Finance → 12; Decision Sciences → 7; Mathematics → 7; Computer Science → 4 (запрос: 165 document results: TITLE-ABS-KEY ((«Sustainable energy» OR «energy security») AND (assessment OR indicator OR index OR estimation) AND China) AND PUBYEAR > 2014). Примером конкретной статьи, иллюстрирующей подобное распределение, может служить работа [10].

Библиометрические данные являются хорошими индикаторами выраженности экспертных интересов к тематике научных исследований со стороны авторов, университетов, фондирующих организаций, издательств. Основное преимущество библиометрии по сравнению с другими индикаторами (в данном контексте – индикаторами энергетической безопасности) заключается в большей доступности исходных материалов – метаданных и полных текстов публикаций.

Исследователям доступны не только реферативные базы WoS и Scopus (подписка к которым имеется у большинства университетов и научно-исследовательских институтов), но и платформы с открытым доступом, такие как ScienceDirect, The Lens, Dimensions.ai, PLOS, PubMed, arXiv, Google Scholar, Microsoft Academic и другие. Значительная часть полных текстов научных публикаций находится в открытом доступе. Таким образом, если исследователь обнаруживает некоторые интересные особенности в библиометрических индикаторах, то у него есть возможность детально проанализировать причины возникновения этих особенностей, обратившись к исходным метаданным или полным текстам публикаций.

Например, примененные выше запросы показывают, что при оценке энергетической безопасности большое значение уделяется возобновляемым источникам энергии и социальным аспектам, при чтении полных текстов становится очевидным, что и возобновляемые источники энергии, и связанные с их эксплуатацией социальные и экологические проблемы в значительной степени носят локальный или региональный характер. Библиометрия позволяет оперативно проверить данное наблюдение. Запрос: «Local Energy Market» к базе Dimensions.ai показывает, что интерес к данной теме возрастает с 36 публикаций в 2011 г. до 358 в 2019 г. В базе Scopus за тот же период число проиндексированных публикаций возрастает с 3 до 46, при этом основной рост происходит начиная с 2017 г. Десятикратное увеличение интереса к теме за девятилетний период со стороны исследователей встречается достаточно редко, что свидетельствует о необходимости ее более детального изучения. Примеры

публикаций по теме «Local Energy Market» приведены в работах [11–16].

Схожих возможностей при работе с перечисленными выше индикаторами энергетической безопасности у исследователя, как правило, нет. Например, в работе [17] говорится о 320 простых и 52 сложных индикаторах энергетической безопасности, но их невозможно использовать, не имея реального доступа к базам данных, на основе которых они составлены.

Встречаются утверждения, что индикаторы энергетической безопасности широко используются для подготовки принятия решений.

Для проверки данного тезиса оценим встречаемость названий индексов в документах, размещенных на профильных сайтах.

Например, по данным Google, на сайте Министерства энергетики США (<https://www.energy.gov/>) размещено примерно 296000 страниц. При поиске по запросу «World Energy Trilemma Index» на данном сайте найден лишь один документ; запрос «International Index of Energy Security Risk» дал 8 результатов; а по запросам: «Sustainable Energy Security Index», «Global Energy Architecture Performance» и «IEA Model of Short-term Energy Security» результатов вообще не было найдено.

На сайте Международного энергетического агентства (<https://www.iea.org/>) размещено примерно 28500 страниц и документов. Поиск по запросам: «World Energy Trilemma Index», «Sustainable Energy Security Index», «International Index of Energy Security Risk», «Global Energy Architecture Performance» не дал результатов; по запросу «IEA Model of Short-term Energy Security» получено 85 результатов, что обусловлено разработкой данного индекса самим агентством IEA.

Оценка встречаемости упоминания индексов на специализированной платформе One Petro (<https://www.onepetro.org/>) производилась с использованием поисковой системы самой базы без ограничения временного интервала при точном соответствии запросу (Advanced search → Exact phrase). Результаты поиска: «World Energy Trilemma Index» – 1; «Sustainable Energy Security Index», «International Index of Energy Security Risk», «IEA Model of Short-term Energy Security» – 0; «Global Energy Architecture Performance» – 3 документа. При этом общее число документов в базе, удовлетворяющих запросу «Energy Security», составляет 660. Для оценки встречаемости упоминания индексов энергетической безопасности в бизнес-документах и общественно-политических текстах рассмотрим запросы к сайту агентства Bloomberg (<https://www.bloomberg.com/>). Их результаты при точном задании названия индекса в запросе поиска по сайту без ограничения временного интервала для всех 5 индексов оказались нулевыми. Запрос «Energy Security» выдал 2070 результатов, что указывает на широкое освещение темы энергетической безопасности на сайте Bloomberg.

Таким образом, частота встречаемости названий 5 индексов, характеризующих оценку энергетической безопасности, – низкая для текстов из разных источников. При этом сама тема энергетической безопасности широко представлена во всех рассматриваемых источниках. Детальный просмотр полных текстов публикаций по тематике энергетической безопасности показывает, что авторов интересуют более конкретные и более детальные исследования, например, анализ

возможностей использования конкретных источников возобновляемой энергии для различных провинций Китая [18, 19] или использование водородной энергетики в Германии, Дании и Нидерландах. Из научных публикаций, непосредственно связанных с оценками энергетической безопасности, высокую цитируемость имеют работы методического характера, например, Sovacool, Mukherjee [17] и Narula, Reddy [6] (К. Narula – соавтор индекса SES. Sustainable Energy Security Index).

В соответствии с выбором Китая как объекта более детального библиометрического анализа научных публикаций ниже исследуются данные по энергетической безопасности Китая, доступные в отчетах агентств, поддерживающих 5 индексов энергетической безопасности.

World Energy Trilemma Index – поддерживается Мировым энергетическим советом (World Energy Council, <https://www.worldenergy.org/>), основанным в 1923 г. и в настоящее время сотрудничающим примерно со 100 национальными организациями. World Energy Council выпускает ежегодные отчеты, которые находятся в открытом доступе и могут служить источником данных по оценке национальной безопасности ряда стран. Поиск по сайту worldenergy.org по ключевым словам «World Energy Trilemma Index» и «China» позволяет выявить три источника информации [5, 18, 19].

Согласно данным источникам, Китай занимает 72 место в рейтинге стран по World Energy Trilemma Index со следующими основными показателями: Energy security rank – 35; Energyequity rank – 70; Enviromental sustainability rank – 108.

Индикаторы показывают, что основной проблемой Китая является высокая экологическая нагрузка на окружающую среду со стороны использования энергии. Вторая проблема – неравенство в доступности к источникам энергии. За последние 20 лет общий показатель World Energy Trilemma Index улучшился на 23% (Trilemma Score Improvements, 2000–2019 гг. – 23%), что позволило Китаю войти в первую десятку стран по данному показателю. Показатель Sustainability Improve улучшился на 53% – Китай прилагает большие усилия для преодоления своей основной проблемы – высокой загрязненности окружающей среды. Китай расширяет использование и разнообразие низкоуглеродистых источников в производстве электроэнергии.

SES. Sustainable Energy Security Index [6]. За разработкой данного индекса стоят конкретные авторы, а не агентство. Поэтому для данного индекса нет ежегодно выпускаемых отчетов. Как уже отмечалось, ценность данного индекса заключается в его детальном методическом описании. На основании такой методики можно построить свои оценки, отражающие подход к решению конкретной задачи, примеры которого можно найти в работах [20, 21].

International Index of Energy Security Risk – разработка Глобального энергетического института Торговой палаты США (<https://www.globalenergyinstitute.org/>). Основные данные по энергетике Китая представлены в отчете [7].

Индекс «Energy Security Risk Scores» Китая, который по данному показателю занимает 8 место среди 25 крупнейших стран, снизился по сравнению с 1980 г. на 36% и равен 884.

Детальные изменения отдельных показателей рисков за 1980–2018 гг.:

- Индекс «Fuel Imports Risk Scores» – существенно вырос, но соизмеримо с другими развивающимися странами.
- Индекс «Energy Expenditures Risk Scores» – снизился более чем на 50%.
- Индекс «Price & Market Volatility Risk Scores» (за 1985–2018 гг.) – снизился приблизительно в два раза.
- Индекс «Energy Use Intensity Risk Scores» – снизился более чем в два раза.
- Индекс «Electric Power Sector Risk Scores» – снизился примерно в два раза.
- Индекс «Environmental Risk Scores» – существенно не изменился, было временное улучшение в 1995 г.
- Индекс «Total Risk» – снизился примерно в полтора раза.

Изменения индексов показывают, что основной проблемой Китая остается высокая зависимость от импорта топлива. Уровень рисков, связанных с загрязнением окружающей среды, является устойчивой проблемой для Китая. По остальным показателям энергетических рисков Китай достиг существенного их снижения за период 1980–2018 гг.

Общие данные по энергетике Китая представлены в отчете за 2020 год по производству нефтепродуктов Китай занимает 7-е, по природному газу – 6-е, по углю – 1-е место в мире. По общему потреблению энергоресурсов и угля Китай занимает 1-е (58%), по потреблению нефти – 2-е (20%), а природного газа – 3-е место в мире (7%). По генерации энергии из возобновляемых источников Китай занимает первое место (4%), равно как и по гидрогенерации (8%), и третье место по генерации на атомных станциях (2%).

Отчеты Глобального энергетического института Торговой палаты США предоставляют достаточно много информации, позволяющей оценивать тренды в изменении рисков стран, используя большое число индексов. С точки зрения использования индексов рисков данный ресурс, пожалуй, самый содержательный.

Global Energy Architecture Performance Index (EAPI) (<http://www3.weforum.org/>) – эффективность глобальной энергетической архитектуры оценивается в отчетах Всемирного экономического форума. Последний отчет по данной тематике был выпущен в 2017 г. [8], в нем указывается, что лидирующие позиции по данному индексу занимают европейские страны, а также Колумбия и Новая Зеландия.

Китай в 2017 г. занимал 95 место по индексу EAPI, который рассчитывается исходя из трех показателей: Economic growth and development, Environmental sustainability, Energy access and security. Низкий рейтинг Китая обусловлен высоким уровнем загрязнения окружающей среды при сохранении лидирующей позиции по потреблению энергоресурсов.

The IEA Model of Short-term Energy Security. Данный показатель разрабатывался и поддерживается Международным энергетическим агентством, которое выпускает регулярные отчеты по различным аспектам энергетики. Мы будем рассматривать результаты, представленные в отчете за 2019 год [22], так как 2020 г. еще не закончился, да и отчет за 2020 год в значительной степени рассматривает влияние коронавируса на состояние мировой энергетической системы [23].

Основные утверждения отчета за 2019 год, касающиеся Китая, сводятся к следующему:

- экономический рост Китая упал с 6,6% в 2018 г. до 6,1% в 2019 г.;
- расходы энергии, затрачиваемые на обогрев и охлаждение, в 2019 г. снизились;
- более 40% мирового роста производства электроэнергии из возобновляемых источников сосредоточено в Китае;
- семь крупных реакторов в Китае вышли на полную годовую эксплуатацию, повысив долю атомной энергетики в электрогенерации;
- доля использования угля в китайской энергетике сокращается;
- наибольший рост мирового спроса на энергию в промышленности пришелся на Китай;
- рост спроса на нефть в Китае для транспорта вырос с 3,5% до 5% – самый большой показатель за последние годы;
- на региональном уровне на долю Китая приходится 90% прироста спроса на энергоресурсы в 2019 г.;
- потребление газа в Китае устойчиво возрастает.

Интересно отметить, что при высоком уровне содержательности отчета Международного энергетического агентства (МЭА) термины «Energy Security» и «IEA Model of Short-term Energy Security» не встречаются в отчете за 2019 год.

Выводы

Рассмотренные 5 индексов оценки энергетической безопасности достаточно редко используются как в научных (Scopus, OnePetro), так и общественно-политических (Bloomberg) публикациях, публикациях аналитических агентств (МЭА) и правительственных структур (Министерство энергетики США).

Вероятнее всего, это связано со слишком большим обобщением данных, предоставляемых этими индексами, более того, отсутствует доступ к исходным данным, на основе которых они построены. В качестве иллюстрации на примере Китая показано, что использование индикаторов в сочетании с регулярными отчетами МЭА может дать только общую картину энергетической безопасности страны, но не позволяет проводить более глубокий анализ.

Публикации, связанные с индексом «SES. Sustainable Energy Security Index», носят глубокий методологический характер, что может быть использовано при проведении других исследований по тематике энергетической безопасности.

Библиометрические исследования также могут служить индикаторами интереса экспертного сообщества (авторов, университетов, финансирующих организаций) к рассматриваемой теме. Основным преимуществом в данном случае является доступность баз библиографических

метаданных (ScienceDirect, The Lens, Dimensions.ai, PLOS, PubMed, arXiv, Google Scholar, Microsoft Academic, Scopus, WoS) и полных текстов публикаций. Еще одним преимуществом является гибкость библиометрического подхода, когда после сбора материалов по результатам предварительных запросов к базам, при ознакомлении с полными текстами публикаций, можно провести уточнение начальных запросов или даже скорректировать рассматриваемую тему. Обычные индикаторы чаще всего статичны и у исследователя может не быть доступа к исходным данным, на основе которых построены индексы.

Библиометрические оценки научных публикаций позволяют выявить нарождающиеся темы исследований, например, за последние годы существенно возрастает интерес к задачам развития местных энергетических рынков в контексте обеспечения энергетической безопасности и увеличения роли возобновляемых источников энергии.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности (фундаментальные, поисковые и прикладные исследования)», № АААА-А19-119013190038-2).

Литература

1. Кононов Ю.А. Анализ зарубежного опыта комплексной оценки состояния энергетической безопасности // Энергетическая политика. 2018. № 6. С. 98–107.
2. Kruyt B., van Vuuren D.P., de Vries H.J.M., Groenenberg H. Indicators for energy security // Energy Policy. 2019. Vol. 37, No. 6. P. 2166–2181. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.006>
3. Ang B.W., Choong W.L., Ng T.S. Energy security: Definitions, dimensions and indexes // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 42. P. 1077–1093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.064>
4. Azzuni A., Breyer C. Definitions and dimensions of energy security: a literature review // Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment. 2017. Vol. 7, No. 1. P. e268. <https://doi.org/10.1002/wene.268>
5. World Energy Trilemma Index 2019, published by the World Energy Council 2019 in partnership with Oliver Wyman. 2019. 79 p. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WETrilemma_2019_Full_Report_v4_pages.pdf (Дата обращения 03.06.2020).

6. *Narula K., Reddy B.* A SES (sustainable energy security) index for developing countries // *Energy*. 2016. Vol. 94. P. 326–343. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.106>
7. International Index of Energy Security Risk: 2020 Edition. Report, April 27, 2020. Global Energy Institute. 2020. 124 p. https://www.globalenergyinstitute.org/sites/default/files/2020-04/iesri-report_2020_4_20_20.pdf (Дата обращения 03.06.2020).
8. Global Energy Architecture Performance Index. Report 2017 World Economic Forum. 2017. 32 p. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Energy_Architecture_Performance_Index_2017.pdf (Дата обращения 03.06.2020).
9. The IEA Model of Short-term Energy Security. Report – December 2011. 48 p. <https://www.iea.org/reports/the-iea-model-of-short-term-energy-security> (Дата обращения 03.06.2020).
10. *Wei W., Cai W., Guo Y., Bai C., Yang L.* Decoupling relationship between energy consumption and economic growth in China's provinces from the perspective of resource security // *Resources Policy*. 2020. Vol. 68. P. 101693. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101693>
11. *Buchmann E., Kessler S., Jochem P., Bohm K.* The costs of privacy in local energy markets // *IEEE 15th Conference on Business Informatics*, 15–18 July 2013: Proceedings. P. 198–207. <https://doi.org/10.1109/cbi.2013.36>
12. *Bremdal B.A., Olivella-Rosell P., Rajasekharan J., Ilieva I.* Creating a local energy market // *CIREN – Open Access Proceedings Journal*. 2017. No. 1. P. 2649–2652. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0730>
13. *Xiao Y., Wang X., Pinson P., Wang X.* A Local energy market for electricity and hydrogen // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, No. 4. P. 3898–3908. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2779540>
14. *Cali U., Cakir O.* Energy policy instruments for distributed ledger technology empowered peer-to-peer local energy markets // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 82888–82900. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2923906>
15. *Zhang W., Wang X., Huang Y., Qi S., Zhao Z., Lin F.* A peer-to-peer market mechanism for distributed energy resources // *IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia)*, 21–24 May 2019: Proceedings. P. 1375–1380. <https://doi.org/10.1109/isgt-asia.2019.8881667>
16. *Zhao D., Wang H., Huang J., Lin X.* Storage or no storage: duopoly competition between renewable energy suppliers in a local energy market // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2019. Vol. 38, No 1. P. 31–47. <https://doi.org/10.1109/jsac.2019.2951970>
17. *Sovacool B.K., Mukherjee I.* Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach // *Energy*. 2011. Vol. 36, No 8. P. 5343–5355. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.043>
18. World Energy Issues Monitor 2020 – Full Report, published by the World Energy Council 2020. 179 p. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Issues_Monitor_2020_-_Full_Report.pdf (Дата обращения 03.06.2020).
19. World Energy Issues Monitor 2019. Global and Regional Perspectives, published by the World Energy Council 2019. 211 p. <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/1.-World-Energy-Issues-Monitor-2019-Interactive-Full-Report.pdf> (Дата обращения 03.06.2020).
20. *Fang D., Shi S., Yu Q.* Evaluation of sustainable energy security and an empirical analysis of China // *Sustainability*. 2018. Vol. 10, No. 5. P. 1685. <https://doi.org/10.3390/su10051685>

21. *Cheng W., Mo D., Tia Y., Xu W., Xie K.* Research on the composite index of the modern Chinese energy system // *Sustainability*. 2018. Vol. 11, No. 1. P. 150. <https://doi.org/10.3390/su11010150>
22. *Global Energy Review 2019*. International Energy Agency. 2019. 50 p. <https://webstore.iea.org/download/direct/2994> (Дата обращения 03.06.2020).
23. *Global Energy Review 2020*. International Energy Agency. The impacts of the COVID-19 crisis on global energy demand and CO₂ emissions. Flagship report – April 2020. 56 p. <https://webstore.iea.org/download/direct/2995> (Дата обращения 03.06.2020).

Analysis of the use of energy security assessment indicators in scientific publications

B.N. Chigarev

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: bchigarev@ipng.ru

Abstract. The article analyzes the general picture of the use of five indicators for assessing energy security: World Energy Trilemma Index, International Index of Energy Security Risk, SES. Sustainable Energy Security Index, Global Energy Architecture Performance, The IEA Model of Short-term Energy Security, proposed by international energy agencies in research studies on energy security. Their rare use in scientific publications and even in the texts of reports of a number of agencies is noted. As an example, the case of China shows that the use of indicators in conjunction with the regular International Energy Agency reports can only give a general picture of the country's energy security, but does not allow a deeper analysis due to the lack of access to the source data. A brief bibliometric analysis of publications on energy security indicators is provided. It is shown that bibliometric indicators can be versatile markers of expert attitude to the topic under study and identify promising areas of research on energy security issues.

Keywords: energy security, energy security indices, China, bibliometric indicators, bibliographic and abstract databases.

Citation: *Chigarev B.N.* Analysis of the use of energy security assessment indicators in scientific publications // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 96–110. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art8> (In Russ.).

References

1. *Kononov Yu.A.* An analytical review of the best foreign practices in the comprehensive energy security assessment // *Energeticheskaya Politika*. 2018. No. 6. P. 98–107. (In Russ.).
2. *Kruyt B., van Vuuren D.P., de Vries H.J.M., Groenenberg H.* Indicators for energy security // *Energy Policy*. 2019. Vol. 37, No. 6. P. 2166–2181. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.006>
3. *Ang B.W., Choong W.L., Ng T.S.* Energy security: Definitions, dimensions and indexes // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 42. P. 1077–1093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.064>
4. *Azzuni A., Breyer C.* Definitions and dimensions of energy security: a literature review // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*. 2017. Vol. 7, No. 1. P. e268. <https://doi.org/10.1002/wene.268>
5. World Energy Trilemma Index 2019, published by the World Energy Council 2019 in partnership with Oliver Wyman. 2019. 79 p. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WETrilemma_2019_Full_Report_v4_pages.pdf (Accessed on 03.06.2020).
6. *Narula K., Reddy B.* A SES (sustainable energy security) index for developing countries // *Energy*. 2016. Vol. 94. P. 326–343. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.106>

7. International Index of Energy Security Risk: 2020 Edition. Report, April 27, 2020. Global Energy Institute. 2020. 124 p. https://www.globalenergyinstitute.org/sites/default/files/2020-04/iesri-report_2020_4_20_20.pdf (Accessed on 03.06.2020).
8. Global Energy Architecture Performance Index. Report 2017 World Economic Forum. 2017. 32 p. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Energy_Architecture_Performance_Index_2017.pdf (Accessed on 03.06.2020).
9. The IEA Model of Short-term Energy Security Report – December 2011. 48 p. <https://www.iea.org/reports/the-iea-model-of-short-term-energy-security> (Accessed on 03.06.2020).
10. Wei W., Cai W., Guo Y., Bai C., Yang L. Decoupling relationship between energy consumption and economic growth in China's provinces from the perspective of resource security // Resources Policy. 2020. Vol. 68. P. 101693. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101693>
11. Buchmann E., Kessler S., Jochem P., Bohm K. The costs of privacy in local energy markets // IEEE 15th Conference on Business Informatics, 15–18 July 2013: Proceedings. P. 198–207. <https://doi.org/10.1109/cbi.2013.36>
12. Bremdal B.A., Olivella-Rosell P., Rajasekharan, J., Ilieva I. Creating a local energy market // CIRED – Open Access Proceedings Journal. 2017. No. 1. P. 2649–2652. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0730>
13. Xiao Y., Wang X., Pinson P., Wang X. A local energy market for electricity and hydrogen // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33, No. 4. P. 3898–3908. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2779540>
14. Cali U., Cakir O. Energy policy instruments for distributed ledger technology empowered peer-to-peer local energy markets // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 82888–82900. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2923906>
15. Zhang W., Wang X., Huang Y., Qi S., Zhao Z., Lin F. A peer-to-peer market mechanism for distributed energy resources // IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia), 21–24 May 2019: Proceedings. P. 1375–1380. <https://doi.org/10.1109/isgt-asia.2019.8881667>
16. Zhao D., Wang H., Huang J., Lin X. Storage or no storage: duopoly competition between renewable energy suppliers in a local energy market // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2019. Vol. 38, No 1. P. 31–47. <https://doi.org/10.1109/jsac.2019.2951970>
17. Sovacool B.K., Mukherjee I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach // Energy. 2011. Vol. 36, No 8. P. 5343–5355. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.043>
18. World Energy Issues Monitor 2020 - Full Report, published by the World Energy Council 2020. 179 p. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Issues_Monitor_2020_-_Full_Report.pdf (Accessed on 03.06.2020).
19. World Energy Issues Monitor 2019. Global and Regional Perspectives, published by the World Energy Council 2019. 211 p. <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/1.-World-Energy-Issues-Monitor-2019-Interactive-Full-Report.pdf> (Accessed on 03.06.2020).
20. Fang D., Shi S., Yu Q. Evaluation of sustainable energy security and an empirical analysis of China // Sustainability. 2018. Vol. 10, No. 5. P. 1685. <https://doi.org/10.3390/su10051685>

21. *Cheng W., Mo D., Tia Y., Xu W., Xie K.* Research on the composite index of the modern Chinese energy system // *Sustainability*. 2018. Vol. 11, No. 1. P. 150. <https://doi.org/10.3390/su11010150>
22. *Global Energy Review 2019*. International Energy Agency. 2019. 50 p. <https://webstore.iea.org/download/direct/2994> (Accessed on 03.06.2020).
23. *Global Energy Review 2020*. International Energy Agency. The impacts of the COVID-19 crisis on global energy demand and CO₂ emissions. Flagship report – April 2020. 56 p. <https://webstore.iea.org/download/direct/2995> (Accessed on 03.06.2020).

Анализ тематики публикаций базы Web of Science за 2019–2020 годы по вопросам чистой энергетики

Б.Н. Чигарев

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: bchigarev@ipng.ru

Аннотация. Приводится краткое обсуждение Программы по переходу к чистой энергетике. Проанализированы ключевые слова 2256 публикаций, проиндексированных в реферативной базе данных Web of Science за период 2019–2020 гг. Показано, что доминирующие ключевые слова хорошо описывают рассматриваемую предметную область, связанную с возобновляемой энергетикой, ее оптимизацией, эмиссией углекислого газа, генерацией и хранением энергии, конкретными видами возобновляемой энергии, ростом экономики, инновациями, эффективностью, спросом и устойчивостью развития. При этом авторы чаще употребляют более общие термины для классификации своих публикаций, а ключевые слова плюс платформы Web of Science в большей степени описывают конкретные процессы, связанные с переходом к чистой энергетике. На основе кластеризации ключевых слов выявлено 5 устойчивых подтем в тематике чистой энергетики. Продемонстрирована возможность использования библиометрического анализа для выделения нарождающейся тематики.

Ключевые слова: Программа по переходу к чистой энергетике, Международное энергетическое агентство, ключевые слова, кластеризация, совместная встречаемость, библиометрический анализ, реферативная база Web of Science.

Для цитирования: Чигарев Б.Н. Анализ тематики публикаций базы Web of Science за 2019–2020 годы по вопросам чистой энергетики // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 111–132. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art9>

Мотивация проведения исследования: в ноябре 2017 г. Международное энергетическое агентство (МЭА), запустило Программу по переходу к чистой энергетике (Clean Energy Transitions Programme – CETP)¹, которая представляет собой амбициозную попытку ускорить глобальный переход к более устойчивому производству с минимальным воздействием на изменение климата.

В Программу вовлечены: Бразилия, Китай, Индия, Индонезия, Мексика и Южная Африка, а также другие страны-члены МЭА, основное внимание уделяется регионам:

Юго-Восточная Азия, Латинская Америка и Африка.

Программа CETP нацелена на более полное использование более чем 40-летнего опыта МЭА в области технологий и организационных решений для содействия сокращению глобальных выбросов парниковых газов, обеспечению всеобщего доступа к электроэнергии и существенного сокращения отрицательного влияния на экологию. Было определено шесть приоритетных направлений работы: 1) данные и статистика; 2) энергоэффективность; 3) электричество; 4) консультирование по вопросам политики и моделированию; 5) отраслевая работа; 6) инновации.

¹ <https://www.iea.org/programmes/clean-energy-transitions-programme>

В рамках данной Программы МЭА сотрудничает со странами в целях совершенствования анализа расходов на передовые разработки; выявление инновационных решений; расширение многостороннего сотрудничества в области энергетических исследований и инноваций, включая обмен передовым опытом между странами.

Энергетический сектор оставался основным источником выбросов CO₂ в 2019 г. – 41%.

Снижение выбросов предполагается осуществлять за счет перехода на чистую энергетику, использующую низкоуглеродные технологии: возобновляемые и атомные источники энергии, улавливание и хранение парниковых газов. В 2019 г. 37% генерации приходилось на низкоуглеродные технологии – рост чуть более 1% по сравнению с 2018 г. Более детально о Clean Energy Transitions Programme (CETP) изложено в отчетах МЭА [1–3].

Большое внимание уделяется повышению безопасности, эффективности, доступности и устойчивости энергосистем за счет их цифровизации.

9 июля 2020 г. состоялся Clean Energy Transitions Summit, особое внимание которого было уделено не только устойчивому и инновационному развитию энергетического сектора, но и важности чистой энергетики в создании новых рабочих мест, компенсирующих рост безработицы, вызванной пандемией коронавируса².

Вышеперечисленное делает актуальным библиометрический анализ научных публикаций за последние два года.

Цель исследования: построение и анализ ландшафта тем научных публикаций за 2019–2020 гг. по вопросу чистой энергетики.

Объект исследования: метаданные научных публикаций из библиографической и реферативной базы данных Web of Science (WoS), собранные по запросу: «TITLE: («Renewable energy» OR «green energy» OR «clean energy»», Timespan: 2019–2020. Indexes: SCI-EXPANDED, SSCI, CPCI-S, ESCI, 26 мая 2020 г.».

Обоснование формирования запроса: тематика возобновляемой, чистой и зеленой энергетики, вследствие своей актуальности, представлена огромным числом научных публикаций. Например, если использовать фильтр TOPIC, то по запросу «TOPIC: («Renewable energy» OR «green energy» OR «clean energy»», Timespan: 2019–2020» получаем 16280 документов, что позволяет сузить фильтрацию до встречаемости указанных ключевых терминов в заголовках публикаций (TITLE) и получить достаточное для проведения библиометрического анализа 2256 результатов. При этом возрастает гарантия соответствия публикаций заданной теме. Диапазон 2019–2020 гг. выбран из соображений построения актуального на момент проведения исследований ландшафта научных публикаций. Выбор индексов SCI-EXPANDED (Science Citation Index Expanded), SSCI (Social Sciences Citation Index), CPCI-S (Conference Proceedings Citation Index) обусловлен стремлением отразить различные стороны публикационной активности по тематике чистой энергетики, включая как статьи в журналах, так и труды конференций, относящиеся к естественно-научным и общественно-научным дисциплинам.

² <https://www.iea.org/events/iea-clean-energy-transitions-summit>

Ряд российских журналов только начинает процесс включения в базу данных Web of Science, поэтому в формирование запроса включен индекс ESCI (Emerging Sources Citation Index), отражающий список журналов, находящихся на рассмотрении для их включения в основные индексы WOS.

Термины «Renewable energy», «green energy», «clean energy» выбраны как наиболее часто встречаемые в заголовках публикаций по рассматриваемой тематике.

Основная информация по 2256 библиометрическим данным базы Web of Science дана в таблице А-1 Приложения А.

Методы исследования: использовались обычные для библиометрического анализа методы, основанные как на частоте встречаемости ключевых терминов (тегов БД), так и на их совместной встречаемости. Тематика научных исследований определялась по ключевым словам авторов публикаций – «Author Keywords» и ключевым словам, генерируемым системой WoS, – «Keyword Plus» (ключевые слова плюс).

В качестве аналитических инструментов использовались бесплатные программы:

- VOSviewer 1.6.15 – программный инструмент для построения и визуализации библиометрических сетей на основе цитирования, библиографических связей, совместного цитирования, соавторства или совместной встречаемости терминов [4].

- Bibliometrix – инструмент с открытым исходным кодом для количественного исследования в

наукометрии и библиометрии, который включает в себя все основные библиометрические методы анализа [5].

Построение и анализ ландшафта тематик научных публикаций на основе совместной встречаемости терминов и концептов

Использовались метаданные 2256 публикаций, экспортированных из базы WoS, собранные по запросу: «TITLE: («Renewable energy» OR «green energy» OR «clean energy»), Timespan: 2019–2020. Indexes: SCI-EXPANDED, SSCI, CPCI-S, ESCI, актуально на 26 мая 2020 г.».

Построение сети совместной встречаемости ключевых слов и их кластеризация осуществлялась с использованием программы VOSviewer 1.6.15.

Минимальная встречаемость ключевых слов, выбираемых для рассмотрения, равнялась четырем. Общее число ключевых слов в рассматриваемых 2256 публикациях (авторских и Keywords Plus, генерируемых WoS) – 9618. Число ключевых слов, встречаемых по крайней мере 4 раза, – 879, в дальнейшем по ним производился анализ. При проведении анализа написание ключевых слов переводилось в нижний регистр, слова не переводились на русский язык с целью сохранения их исходных значений.

Для сокращения числа кластеров, в которые агрегируются ключевые слова (KW), введено дополнительное ограничение: не менее 100 KW в кластере.

В табл. 1 представлены 40 терминов (Author KW + KW Plus), описывающих рассматриваемую предметную область, связанную с чистой энергетикой.

Доминируют ключевые слова, связанные с возобновляемой энергетикой, ее оптимизацией, эмиссией углекислого газа, генерацией и хранением энергии, перечислены виды возобновляемой энергии: энергия ветра, солнечная энергия, биомассы, используются термины, отражающие экономическую сторону энергетики: цена, управление, интеграция, рост экономики, инновации, эффективность, спрос, устойчивость. Китай также входит в список 40 наиболее часто встречаемых

ключевых слов. Экологическая кривая Кузнецца – данный термин широко используется в публикациях по теме «чистая энергетика», например [6].

Если рассматривать отдельно ключевые слова самих авторов, то при общем числе 6671 KW – 353 KW встречаются не менее четырех раз, при этом общее число ключевых слов плюс (Keywords Plus), генерируемых платформой WoS, – 3634, а встречаемых чаще четырех раз – 547.

Таблица 1

40 наиболее часто встречаемых ключевых слов в выборке из 2256 метаданных (Author Keywords и Keywords Plus)

Keyword	N-kw	Keyword	N-kw	Keyword	N-kw	Keyword	N-kw
renewable energy	641	storage	124	solar	87	power-generation	58
optimization	242	consumption	123	wind energy	85	biomass	56
generation	173	management	123	economic-growth	83	uncertainty	56
wind	169	model	122	technologies	82	cost	55
renewable energy sources	154	impact	112	sustainability	71	operation	55
system	148	power	108	China	66	demand response	53
CO ₂ emissions	137	electricity	100	efficiency	65	environmental Kuznets curve	53
design	132	wind power	96	energy storage	64	emissions	51
performance	130	policy	92	algorithm	60	impacts	50
systems	130	integration	88	innovation	58	solar energy	50

Примечания: keyword – название термина, N-kw – встречаемость термина.

В табл. 2 представлен результат сравнения 30 наиболее встречаемых ключевых слов авторов публикаций и ключевых слов платформы WoS. Из табл. 2 видно, что авторы чаще употребляют более общие термины для классификации своих публикаций: возобновляемая энергетика, источники возобновляемой энергетики, хранение энергии, энергетический переход, устойчивое развитие, изменение климата, а

платформа WoS, которая формирует список «ключевых слов плюс» на основе анализа полных текстов публикаций, несколько по-другому описывает тематику, в этом случае доминируют термины: оптимизация, генерация, система, управление, модель, интеграция, технологии, алгоритм и даже экологическая кривая Кузнецца, которые в большей степени описывают реализацию тем, заявленных в ключевых словах авторов.

Таблица 2

**Сравнение 30 наиболее встречаемых ключевых слов авторов публикаций
и ключевых слов платформы WoS**

Author Keywords	N-kw	Keywords Plus	N-kw
renewable energy	617	optimization	210
renewable energy sources	154	generation	173
energy storage	64	system	148
optimization	52	wind	148
solar energy	50	design	129
wind energy	49	systems	129
economic growth	48	performance	126
CO ₂ emissions	39	consumption	123
energy policy	39	management	123
energy transition	39	model	122
sustainability	38	storage	119
microgrid	36	impact	111
energy	34	CO ₂ emissions	109
sustainable development	34	power	107
uncertainty	33	electricity	93
energy efficiency	32	policy	85
renewable energy consumption	32	integration	84
climate change	31	economic-growth	83
demand response	30	technologies	81
hybrid renewable energy system	28	wind power	76
clean energy	27	solar	71
renewable energy resources	27	algorithm	59
china	25	power-generation	58
biomass	24	efficiency	55
wind	24	cost	54
wind power	24	operation	54
energy management	22	impacts	49
green energy	22	environmental Kuznets curve	48
photovoltaic	22	demand	46
renewables	22	emissions	45

Это отражается и на кластеризации ключевых слов авторов, ключевых слов платформы WoS и суммы данных ключевых слов. Кластеризация основана на совместной

встречаемости ключевых слов в публикации, алгоритм кластеризации детально описан в руководстве пользователя программы VOSviewer 1.6.15.

Выделение доминирующих ключевых слов в каждом кластере позволяет снизить предвзятость в дальнейшем сборе научных публикаций по более узкому вопросу, например, для составления систематического обзора [7]. Известная проблема узких специалистов: они хорошо видят свою тему, завышают значимость близких им ключевых терминов и склонны недооценивать чужую тематику [8, 9]. При этом значительная часть инноваций реализуется именно на стыке областей исследований.

В Приложении Б на рис. Б.1–Б.3 дано графическое представление результатов кластеризации совместной встречаемости ключевых слов, полученное с использованием программы VOSviewer 1.6.15.

Сопоставим 30 наиболее часто встречаемых ключевых слов (Author KW + KW Plus), полученных для пяти кластеров.

30 наиболее часто встречаемых ключевых слов (Author KW + KW Plus) *первого кластера*: renewable energy → 641; wind → 169; impact → 112; power → 108; electricity → 100; policy → 92; integration → 88; wind energy → 85; sustainability → 71; innovation → 58; cost → 55; impacts → 50; demand → 46; climate-change → 42; technology → 40; energy policy → 39; energy transition → 39; policies → 37; strategies → 37; barriers → 35; determinants → 34; energy → 34; investment → 33; resources → 33; transition → 32; climate change → 31; future → 29; acceptance → 28; market → 28; flexibility → 26 публикаций.

Тематика, связанная с данным кластером, касается в большей степени общих вопросов возобновляемой энергетики: задач интеграции, устойчивости, изменения климата, инноваций и технологий, энергетической политики и стратегии, энергетического перехода, ресурсов,

инвестиций, рынка, барьеров, приемлемости и гибкости решений.

Примеры статей, отражающих тематику *первого кластера*:

В статье Child et al. [10] продемонстрировано, что технологии хранения энергии и объединения энергосистем могут способствовать переходу на оптимальную с точки зрения затрат 100-процентную систему возобновляемой энергетики для Европы к 2050 г. В работе проведено сопоставление сценариев, в рамках которых конкретные страны и макрорегионы Европы либо являются энергетическими независимыми, либо связаны между собой, и проанализировано то, как это отразится на стоимости энергетической системы.

Согласно первому сценарию, в 2050 г. на солнечные фотоэлектрические электростанции будет приходиться 45% выработки энергии, на энергию ветра – 30% и 11% – на энергию гидроэлектростанций, в систему обмена возобновляемой энергетики будет включено 73% источников энергии, а согласно второму сценарию – 81%.

Основной целью публикации [11] является демонстрация возможностей, которые предоставляет объединение различных видов возобновляемой энергетики, средств аккумулирования энергии и передовых технологий для достижения целевых показателей реализации энергетического перехода.

Авторами разработан алгоритм, позволяющий оценить влияние внедрения ветровых и солнечных фотоэлектрических установок на возрастание доли возобновляемой энергетики в генерации электроэнергии. Результаты работы применены к данным по возобновляемой энергетике Германии.

30 наиболее часто встречаемых ключевых слов (Author KW + KW Plus) *второго кластера*: optimization → 242; generation → 173; renewable energy sources → 154; system → 148; design → 132; systems → 130; storage → 124; management → 123; model → 122; wind power → 96; energy storage → 64; algorithm → 60; uncertainty → 56; operation → 55; demand response → 53; simulation → 42; microgrids → 39; battery → 38; microgrid → 36; reliability → 35; distributed generation → 34; strategy → 31; electric vehicles → 28; solar power → 28; renewable energy resources → 27; implementation → 25; particle swarm optimization → 25; genetic algorithm → 24; unit commitment → 23; allocation → 22 публикации.

В данном кластере публикаций чаще всего рассматриваются вопросы оптимизации генерации электроэнергии из возобновляемых источников – в основном, это энергия ветра и солнца. При этом рассматривается широкий спектр вопросов, включающий управление; операционную деятельность; хранение энергии, включая батареи; развитие электротранспорта, распределенных источников генерации и микросетей; задачи моделирования и алгоритмы.

Примеры статей, отражающих тематику *второго кластера*:

В работе [12] предлагается программная платформа для надежной разработки многокомпонентных энергетических систем в условиях ограниченной информации о вводимых данных. Реализуется оптимальное проектирование децентрализованной системы, которая включает в себя возобновляемые источники энергии и системы хранения энергии. Задача решается

методом смешанного целочисленного линейного программирования, который оптимизирует работу системы с учетом потребностей конечных потребителей энергии, и минимизирует общие годовые затраты и выбросы CO₂.

В работе [13] авторы анализируют статистическую информацию о состоянии энергетической системы: потребности в электроэнергии и тепловой энергии, объемы аккумуляторных батарей и тепловых резервуаров, цены на электроэнергию и т.д.

Далее они решают проблему минимизации эксплуатационных затрат для типичной микросети, интегрированной с ТЭЦ, анализируют воздействие включения возобновляемых источников энергии и энергетических хранилищ на функционирование микросети. Результаты проведенного моделирования показали, что эксплуатационные затраты микросети могут быть значительно снижены при использовании предложенного авторами алгоритма.

30 наиболее часто встречаемых ключевых слов (Author KW + KW Plus) *третьего кластера*: solar → 87; technologies → 82; power-generation → 58; electricity-generation → 43; sustainable development → 43; PV → 42; feasibility → 41; framework → 40; solar-energy → 36; challenges → 35; power-system → 35; rural electrification → 34; decision-making → 28; hybrid renewable energy system → 28; optimal-design → 25; renewables → 22; selection → 22; plants → 21; renewable energies → 20; desalination → 19; network → 19; multiobjective optimization → 18; solar PV → 18; fuel-cell → 17; technoeconomic analysis → 16; topsis → 16; photovoltaics → 15; analytic hierarchy process → 14; hybrid renewable energy systems → 14; Pakistan → 14 публикаций.

Ключевые слова данного кластера в большей степени касаются вопросов генерации и технологий возобновляемой энергетики, ее устойчивому развитию, вызовам, принятию решений, гибридным системам, технологическому анализу, электрификации сельских районов, опреснению, оптимальному проектированию. Пакистан является примером развивающейся страны, для которой актуальны вышеперечисленные задачи.

Примеры статей, отражающих тематику *третьего кластера*:

В работе [14] анализируется применимость опыта Дании в использовании центрального отопления за счет использования солнечной энергии (solar district heating (SDH)) для Китая. Оценка применимости опыта проводилась с использованием методов анализа PEST (политика, экономика, социальные и технологические аспекты) и SWOT (сильные стороны, слабые места, возможности и угрозы). В 2014 г. на долю Китая приходилось 75,8% от общего количества солнечных коллекторов в мире и только менее чем 0,3% солнечных коллекторов были использованы для отопления помещений. Проведены исследования для определения применимости SDH в сельских районах. Обобщена стратегии развития SDH, дорожная карта и процесс принятия решений для проектов на основе SDH. Показана целесообразность использования SDH для таких удаленных районов как Тибет.

Авторы работы [15] изучали возможности электрификации сельских районов с использованием автономных систем возобновляемой энергетики как для отдельного дома, так и для общинной микросети. Проанализированы

шесть домашних систем и 15 микросетей, разработаны и оптимизированы прототипы систем для сельской общины на Филиппинах (рассматривались как автономные, так и гибридные энергосистемы). Показано, что гибридные системы, включающие в себя источники солнечной энергии и энергии ветра, при использовании свинцово-кислотных аккумуляторов, включенных в местную микросеть, имеют высокую эффективность. При этом PV-системы рациональнее использовать для отдельных домов, более крупные ветровые турбины – в общинных микросетях.

30 наиболее часто встречаемых ключевых слов (Author KW + KW Plus) *четвертого кластера*: performance → 130; efficiency → 65; biomass → 56; emissions → 51; solar energy → 50; hydrogen → 38; energy efficiency → 32; sustainable energy → 29; water → 27; green energy → 26; bioenergy → 24; life-cycle assessment → 24; carbon → 20; CO₂ → 18; dynamics → 17; oil → 17; biofuels → 16; biogas → 16; photovoltaic systems → 15; biofuel → 14; decomposition → 14; economy → 14; fuel → 14; circular economy → 13; temperature → 13; conversion → 12; hydrogen-production → 11; nanoparticles → 11; pyrolysis → 11; recovery → 11 публикаций.

В данном кластере обращают на себя внимание ключевые слова, связанные с биотопливом, с использованием биомассы как источника энергии, с водородом и его производством; дополняя это словами: emissions, water, carbon, CO₂, получаем тему зеленой энергетики (green energy). Эффективность энергетики (performance, efficiency, energy efficiency, sustainable energy, life-cycle assessment, dynamics, economy, circular economy) является доминирующей смысловой нагрузкой для данного кластера.

Примеры статей, отражающих тематику *четвертого кластера*:

В статье [16] отмечается, что в настоящее время возрастает потребность в альтернативных, экономичных, возобновляемых и «зеленых» источниках энергии, таких как водород. В последнее время большое внимание привлекают биологические методы производства водорода, так как традиционные методы являются дорогостоящими, энергоемкими и неэкологичными. Применение биологических методов позволит утилизировать отходы для производства энергии. Около 94% отходов в Индии чаще всего просто выбрасывается, а их количество растет примерно на 1,3% в год.

Авторами разрабатывается эффективный, двухступенчатый метод получения водорода из органических отходов. На первом этапе в результате темновой ферментации накапливаются летучие жирные кислоты, которые используются на втором этапе для фотоферментации подходящими бактериями. Основной задачей исследования явилась разработка условий совместного культивирования бактерий для темновой и фотоферментации в одном реакторе для улучшенного выхода водорода.

Общей целью работы [17] является исследование масштабов спроса на биомассу в системе полностью возобновляемых источников энергии. Экстенсивное землепользование для производства биомассы угрожает превысить допустимые значения, которые, по мнению международных экспертов, в 2050 г. составят около 10–30 ГДж на человека в год.

Из работы следует, что глобальный потенциал биомассы, т.е. сколько биомассы может быть доступно для биоэнергетики в будущем, к 2050 г. может составить не менее

100 ЭДж/год³, что эквивалентно 10 ГДж/чел/год при равномерном распределении потребления энергии. При этом спрос на биомассу для полностью возобновляемых источников энергии лежит в диапазоне от 0 ГДж/чел/год до 25 ГДж/чел/год в случае реализации высоко интегрированных, электрифицированных систем, включающих использование водорода, и более 200 ГДж/чел/год для плохо интегрированных сценариев с использованием биоэнергии без электрификации или водородной интеграции.

30 наиболее часто встречаемых ключевых слов (Author KW + KW Plus) *пятого кластера*: CO₂ emissions → 137; consumption → 123; economic-growth → 83; China → 66; environmental Kuznets curve → 53; economic growth → 48; financial development → 45; cointegration → 43; nonrenewable energy → 42; panel-data → 42; clean energy → 40; carbon emissions → 39; countries → 39; electricity consumption → 38; growth → 37; trade → 35; carbon-dioxide emissions → 33; renewable energy consumption → 32; time-series → 31; unit-root tests → 30; empirical-evidence → 25; error-correction → 23; foreign direct-investment → 22; panel → 22; energy consumption → 21; GDP → 20; nexus → 20; urbanization → 20; output → 18; trade openness → 18 публикаций.

Данный кластер в первую очередь касается темы эмиссии углекислого газа, вызванного экономическим ростом в таких странах как Китай, который требует большего потребления энергии как из возобновляемых, так и невозобновляемых источников; для развивающихся стран характерно возрастание урбанизации, важность прямых зарубежных инвестиций и развития торговли.

³ ЭДж – 1 exajoule = 10¹⁸ joules

Примеры статей, отражающих тематику *пятого кластера*:

В работе [18] исследуется причинно-следственная связь между выбросами углекислого газа, потреблением энергии, возобновляемыми источниками энергии, ростом численности населения и экономическим ростом стран региона. Анализ данных проведен для пяти членов АСЕАН (Индонезии, Мьянмы, Малайзии, Филиппин и Таиланда) за период 1971–2014 гг. Результаты не выявили долгосрочной взаимосвязи между рассматриваемыми переменными для Филиппин и Таиланда, однако такая взаимосвязь существует для Индонезии, Мьянмы и Малайзии. Связь между переменными для разных стран значительно варьируется. В Малайзии, Таиланде и Филиппинах связь между выбросами углерода, потреблением энергии и потреблением возобновляемых источников энергии отсутствует. В Индонезии наблюдается однонаправленная зависимость экономического роста от потребления возобновляемой энергии как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе, а также зависимость увеличения выбросов CO₂ от экономического роста и потребления энергии. В Мьянме, до внедрения возобновляемых источников энергии, наблюдался однонаправленный эффект зависимости потребления энергии от роста ВВП и численности населения.

В работе [19] отмечается, что Китай является крупнейшим в мире источником парниковых газов, диоксида серы, оксидов азота и твердых частиц, поскольку он потребляет самое большое в мире количество энергии: 67% потребления – первичная энергия и 73% – выработка электроэнергии из угля. Чтобы справиться с проблемами энергетической безопасности и окружающей

среды, Китай активно развивает возобновляемую энергетику с 2000 г. и добился быстрого прогресса (со среднегодовым темпом роста в 62,5% за последнее десятилетие). Китай планирует достичь 16% потребления возобновляемых источников энергии (ВИЭ) к 2030 г., оптимистические прогнозы показывают, что Китай может достичь 26% к 2030 г. и 60% – к 2050 г., при этом генерация электроэнергии из ВИЭ может составлять 86%. С другой стороны, китайские ветряные и солнечные энергетические технологии недостаточно рентабельны и в настоящее время возобновляемая энергетика все еще не конкурентоспособна.

В качестве примера публикации, отражающей такие ключевые слова пятого кластера как: *consumption, electricity consumption, renewable energy consumption, energy consumption, cointegration, time-series, trade openness*, а также нарождающегося интереса к тематике «Управление спросом» (*Demand response – DR*), показанного на рис. Б.4 Приложения Б, можно предложить работу [20]. Управление спросом нацелено на регулирование цены на электроэнергию, снижение потребности в строительстве генерирующих и сетевых мощностей, интеграцию ВИЭ и электротранспорта, внедрение инновационных цифровых технологий на стороне потребителя.

Государства Евросоюза, Австралия, Китай и Япония внедряют механизмы управления спросом для формирования локальных энергорынков.

Управление спросом начало внедряться в США в 1999 г, в Южной Корее – в 2014 г., в России – в 2017 г. Управление спросом начало внедряться в США в 1999 г, в Южной Корее – в 2014 г., в России – в 2017 г.

Для вовлечения потребителей в процессы управления спросом (DR) необходимо внедрять экономические стимулы, технические решения и правовое регулирование. В ряде зарубежных энергосистем внедрение механизма DR позволило организовать централизованное управление ресурсами потребителей в объеме 2–6% от пикового спроса.

Для эффективного решения задач управления спросом, особенно для систем, включающих ВИЭ, необходимо развивать локальные энергетические рынки [21, 22].

Программа VOSviewer 1.6.15 позволяет не только производить кластеризацию на основе совместной встречаемости ключевых слов в документах, но и рассматривать использование ключевых слов на временной шкале. При этом детальное изучение отдельных участков кластеров позволяет выделить участок нарождающейся тематики исследований. В качестве такого примера на рис. Б.4 Приложения Б графически показан участок кластера, отражающий нарождающуюся тематику «Управление спросом».

В качестве примера сравнения результатов кластеризации ключевых слов, полученных с использованием разных алгоритмов, в таблицах А.2 и А.3 Приложения А представлены по три кластера наиболее часто встречаемых Author Keywords и Keywords Plus. Кластеризация проведена с использованием программы Bibliometrix [5].

Выводы

Тематика, отражающая содержание Программы по переходу на экологически

чистую энергетику (Clean Energy Transitions Programme – CETP) широко представлена в научных статьях, индексируемых в реферативной базе данных Web of Science; за период 2019–2020 гг. опубликовано 2256 работ.

Доминирующие ключевые слова, описывающие рассматриваемую предметную область, связаны с возобновляемой энергетикой, ее оптимизацией, эмиссией углекислого газа, генерацией и хранением энергии, конкретными видами возобновляемой энергии: энергией ветра, солнечной энергией, переработкой биомассы; используются термины, отражающие экономическую сторону энергетики: цена, управление, интеграция, рост экономики, инновации, эффективность, спрос, устойчивость.

Показано, что авторы чаще употребляют более общие термины для классификации своих публикаций: возобновляемая энергетика, источники возобновляемой энергетики, хранение энергии, энергетический переход, устойчивое развитие, изменение климата. Ключевые слова платформы WoS в большей степени описывают конкретные процессы, используя термины: оптимизация, генерация, система, управление, модель, интеграция, технологии, алгоритм, экологическая кривая Кузнеця.

Проведена кластеризация ключевых слов на основе их совместной встречаемости в документах, которая позволила выявить 5 устойчивых подтем (кластеров) в тематике чистой энергетики.

На примере термина Demand response показана возможность использования библиометрического анализа для выделения нарождающейся тематики.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности (фундаментальные, поисковые и прикладные исследования)», № АААА-А19-119013190038-2).

Литература

1. Special report on clean energy innovation. Accelerating technology progress for a sustainable future. IEA report, July 2020. 185 p. <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation> (Дата обращения 10.07.2020).
2. Nuclear power in a clean energy system. IEA report, May 2019. 103 p. <https://webstore.iea.org/download/direct/2779> (Дата обращения 10.07.2020).
3. World energy investment 2020. IEA report, May 2020. 207 p. <https://webstore.iea.org/download/direct/3003> (Дата обращения 10.07.2020).
4. van Eck N.J., Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping // *Scientometrics*. 2009. Vol. 84, No. 2. P. 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
5. Aria M., Cuccurullo C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis // *Journal of Informetrics*. 2017. Vol. 11, No. 4. P. 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
6. Шкиперова Г.Т. Экологическая кривая Кузнеца как инструмент исследования регионального развития // *Экономический анализ: теория и практика*. 2013. № 19. С. 8–16. <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-krivaya-kuznetsa-kak-instrument-issledovaniya-regionalnogo-razvitiya> (Дата обращения 10.07.2020).
7. Li D., Wang Z., Wang L., Sohn S., Shen F., Murad M.H., Liu H. A text-mining framework for supporting systematic reviews // *American Journal of Information Management*. 2016. Vol. 1, No. 1. P. 1–9. <http://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=105&doi=10.11648/j.informgmt.20160101.11> (Дата обращения 10.07.2020).
8. Blankson S.K.K. Past, present and future as time in the age of science. 2nd ed. London: Blankson Enterprises Ltd., 2016. 212 p.
9. Breit W., Culbertson W.P., Jr. Science and ceremony: The institutional economics of C. E. Ayres. Austin: University of Texas Press, 2014. 228 p.
10. Child M., Kemfert C., Bogdanov D., Breyer C. Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe // *Renewable Energy*. 2019. Vol. 139. P. 80–101. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.077>
11. Tafarte P., Eichhorn M., Thrän D. Capacity expansion pathways for a wind and solar based power supply and the impact of advanced technology – A case study for Germany // *Energies*. 2019. Vol. 12, No. 2. P. 324. <https://doi.org/10.3390/en12020324>
12. Gabrielli P., Fürer F., Mavromatidis G., Mazzotti M. Robust and optimal design of multi-energy systems with seasonal storage through uncertainty analysis // *Applied Energy*. 2019. Vol. 238. P. 1192–1210. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.064>
13. Zhang G., Shen Z., Wang L. Online energy management for microgrids with CHP co-generation and energy storage // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2020. Vol. 28, No. 2. P. 533–541. <https://doi.org/10.1109/tcst.2018.2873193>
14. Huang J., Fan J., Furbo S. Feasibility study on solar district heating in China // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 108. P. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.014>

15. *Aberilla J.M., Gallego-Schmid A., Stamford L., Azapagic A.* Design and environmental sustainability assessment of small-scale off-grid energy systems for remote rural communities // *Applied Energy*. 2020. Vol. 258. P. 114004. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114004>
16. *Sharma S., Basu S., Shetti N.P., Aminabhavi T.M.* Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 713. P. 136633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>
17. *Mortensen A.W., Mathiesen B.V., Hansen A.B.* et al. The role of electrification and hydrogen in breaking the biomass bottleneck of the renewable energy system – A study on the Danish energy system // *Applied Energy*. 2020. Vol. 275. P. 115331. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115331>
18. *Vo A.T., Vo D.C., Le Q.T.* CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth: new evidence in the ASEAN countries // *Journal of Risk and Financial Management*. 2019. Vol. 12, No. 3. P. 145. <https://doi.org/10.3390/jrfm12030145>
19. *Yang X.J., Hu H., Tan T., Li J.* China's renewable energy goals by 2050 // *Environmental Development*. 2016. Vol. 20. P. 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2016.10.001>
20. Demand response на российском рынке: барьеры и перспективы. VYGON Consulting. Декабрь 2018. 58 с. http://vygon.consulting/upload/iblock/7c7/vygon_consulting_dr.pdf (Дата обращения 10.07.2020).
21. *Siano P., De Marco G., Rolan A., Loia V.* A survey and evaluation of the potentials of distributed ledger technology for peer-to-peer transactive energy exchanges in local energy markets // *IEEE Systems Journal*. 2019. Vol. 13, No. 3. P. 3454–3466. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2903172>
22. *Etukudor C., Couraud B., Robu V.* et al. Automated negotiation for peer-to-peer electricity trading in local energy markets // *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 920. <https://doi.org/10.3390/en13040920>

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение А

Таблица А.1

**Основная информация по 2256 библиометрическим данным базы Web of Science
по теме «Чистая энергетика»**

Description	Results	Описание
<i>Main information about data</i>		<i>Основная информация</i>
Timespan	2019:2020	Временной диапазон
Sources (Journals, Books etc.)	665	Источники (журналы, книги и т.д.)
Documents	2147	Число документов
Average years from publication	0.747	Среднее время с момента публикации
Average citations per documents	2.044	Средняя цитируемость документа
Average citations per year per doc	1.094	Средняя цитируемость в год
References	80193	Число ссылок
<i>Document types</i>		<i>Типы документов</i>
Article	1577	Статьи
book chapter	1	Главы из книг
data paper	4	Публикация данных
Book review	11	Рецензии на книгу
Correction	11	Исправления
Editorial material	62	Редакционные материалы
Letter	2	Письма
Meeting abstract	15	Аннотации совещаний
News item	13	Новостные материалы
Proceedings paper	303	Материалы конференций
Review	148	Обзоры
<i>Document contents</i>		<i>Содержание документов</i>
Keywords Plus (ID)	3594	Ключевые слова плюс
Author Keywords (DE)	6810	Авторские ключевые слова
<i>Authors</i>		<i>Авторы</i>
Authors	6446	Число авторов
Author Appearances	7658	Встречаемость авторов
Authors of single-authored documents	206	Авторы без соавторов
Authors of multi-authored documents	6240	Авторы в соавторстве
<i>Authors collaboration</i>		<i>Сотрудничество авторов</i>
Single-authored documents	224	Число документов с одним автором
Documents per Author	0.333	Число документов на одного автора
Authors per Document	3	Число авторов на один документ
Co-Authors per Documents	3.57	Среднее число авторов на документ
Collaboration Index	3.24	Индекс сотрудничества

Таблица А.2

**35 наиболее часто встречаемых ключевых плюс слов для трех кластеров:
consumption, impact и optimization**

KW_N	Cluster_1	KW_N	Cluster_2	KW_N	Cluster_3
130	<i>consumption</i>	111	<i>impact</i>	220	<i>optimization</i>
98	CO ₂ emissions	99	electricity	174	generation
85	economic-growth	89	policy	155	system
64	emissions	55	efficiency	150	wind
48	environmental Kuznets curve	50	impacts	132	systems
45	cointegration	46	innovation	131	performance
43	China	42	climate-change	129	design
42	panel-data	39	technology	126	management
40	countries	39	framework	125	model
35	nonrenewable energy	38	wind energy	123	storage
34	growth	38	sustainability	112	power
33	determinants	36	policies	84	integration
33	electricity consumption	32	challenges	82	technologies
32	trade	31	transition	76	wind power
31	time-series	31	acceptance	72	solar
30	financial development	30	barriers	64	algorithm
30	carbon-dioxide emissions	28	market	58	power-generation
29	unit-root tests	28	future	56	operation
28	renewable energy	25	support	54	cost
27	carbon emissions	25	implementation	48	demand
25	empirical-evidence	23	attitudes	43	electricity-generation
25	panel	23	risk	41	feasibility
24	carbon	20	climate	38	biomass
23	error-correction	20	security	36	simulation
22	CO ₂	20	benefits	36	solar-energy
22	prices	19	politics	35	strategies
20	nexus	19	deployment	35	power-system
19	foreign direct-investment	18	diffusion	33	resources
18	tests	18	investment	32	PV
17	output	17	models	32	strategy
16	natural-gas	16	projects	28	water
16	gdp	16	costs	28	uncertainty
16	oil	15	drivers	25	microgrids
16	dynamics	15	governance	25	optimal-design
15	decomposition	15	green	25	rural electrification

Примечания: KW_N – встречаемость ключевого слова.

Алгоритм кластеризации – Louvain, минимальное число ключевых слов в кластере – 5, для анализа использовались 250 наиболее часто встречаемых ключевых слов. Кластер «Оптимизация» доминирует в ключевых словах платформы WoS (Keyword Plus) темы «Чистая энергетика».

Таблица А.3

**Наиболее часто встречаемые авторские ключевые слова для трех кластеров:
renewable energy, power и renewable energy sources**

KW_ N	Cluster_1	KW_ N	Cluster_1	KW_ N	Cluster_2	KW_ N	Cluster_3
648	<i>renewable energy</i>	32	<i>renewable energy consumption</i>	34	<i>power</i>	132	<i>renewable energy sources</i>
131	energy	32	sustainable development	27	wind power	65	energy storage
69	renewable	29	energy efficiency	20	control	37	uncertainty
63	optimization	28	battery	20	renewable energy system	28	demand response
47	wind energy	27	clean energy	18	power system	23	system
46	economic growth	25	photovoltaic	18	sources	22	reliability
44	solar energy	25	China	17	power grids	18	energy storage system
43	sustainability	24	biomass	17	hybrid	17	programming
41	energy policy	23	renewable energy resources	16	solar power	15	systems
39	wind	23	energy management	16	smart grid	14	planning
36	microgrid	22	hybrid renewable energy system	16	power generation control	13	scheduling
36	solar	22	renewables	15	electric vehicles	13	power generation
34	energy transition	21	green energy	14	generation	12	management
34	CO ₂ emissions	21	investment	14	electricity	11	wind turbines
32	climate change	20	hydrogen	12	voltage control	11	demand side management

Примечания: Первые два столбца KW_N относятся к одному кластеру, который существенно доминирует над остальными.

В авторских ключевых словах существенно доминирует термин «возобновляемая энергетика». По мнению автора данной работы, ключевые слова, генерируемые алгоритмами машинного обучения на базе текстов, индексируемых реферативными базами, представляют больший интерес для библиометрического анализа, чем авторские ключевые слова, которые более подвержены влиянию доминирующих шаблонов (renewable energy является типичным примером такого шаблона).

Графическое представление некоторых результатов библиометрического анализа, полученное с использованием программы VOSviewer

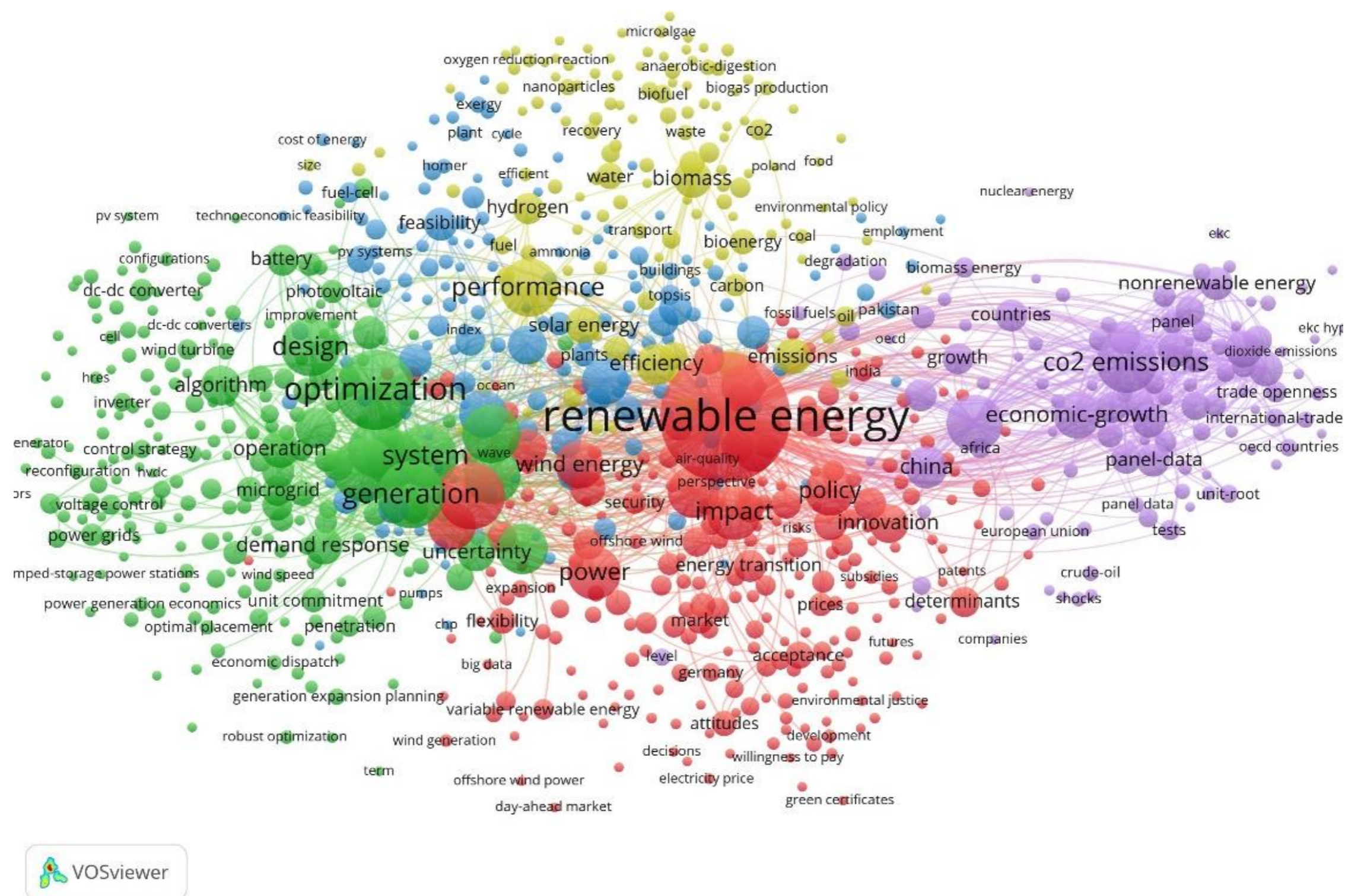


Рис. Б.1. Графическое представление кластеризации совместной встречаемости всех ключевых слов (Author KW + KW Plus)



128

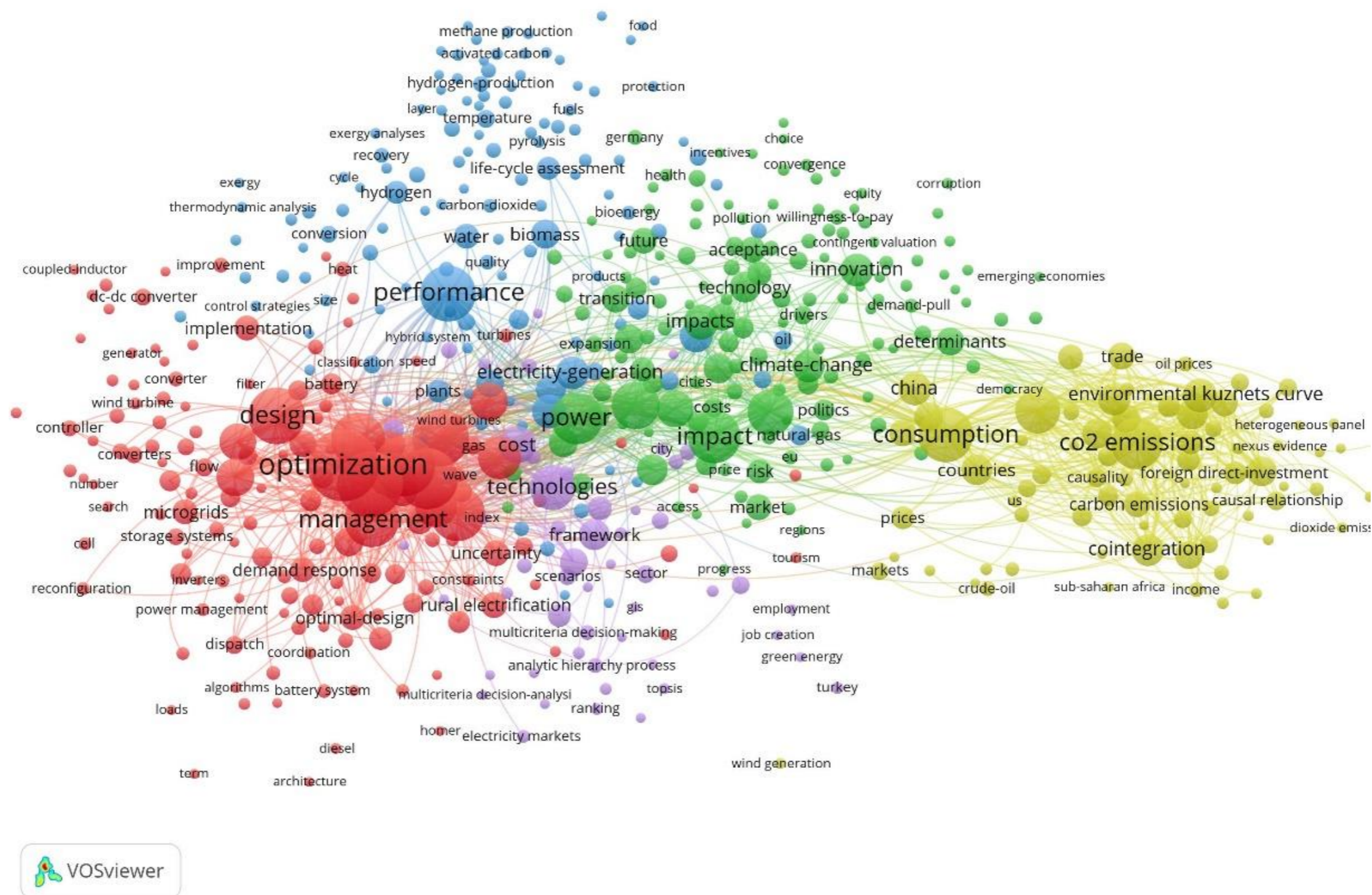


Рис. Б.3. Графическое представление кластеризации совместной встречаемости «ключевых слов плюс» платформы WoS

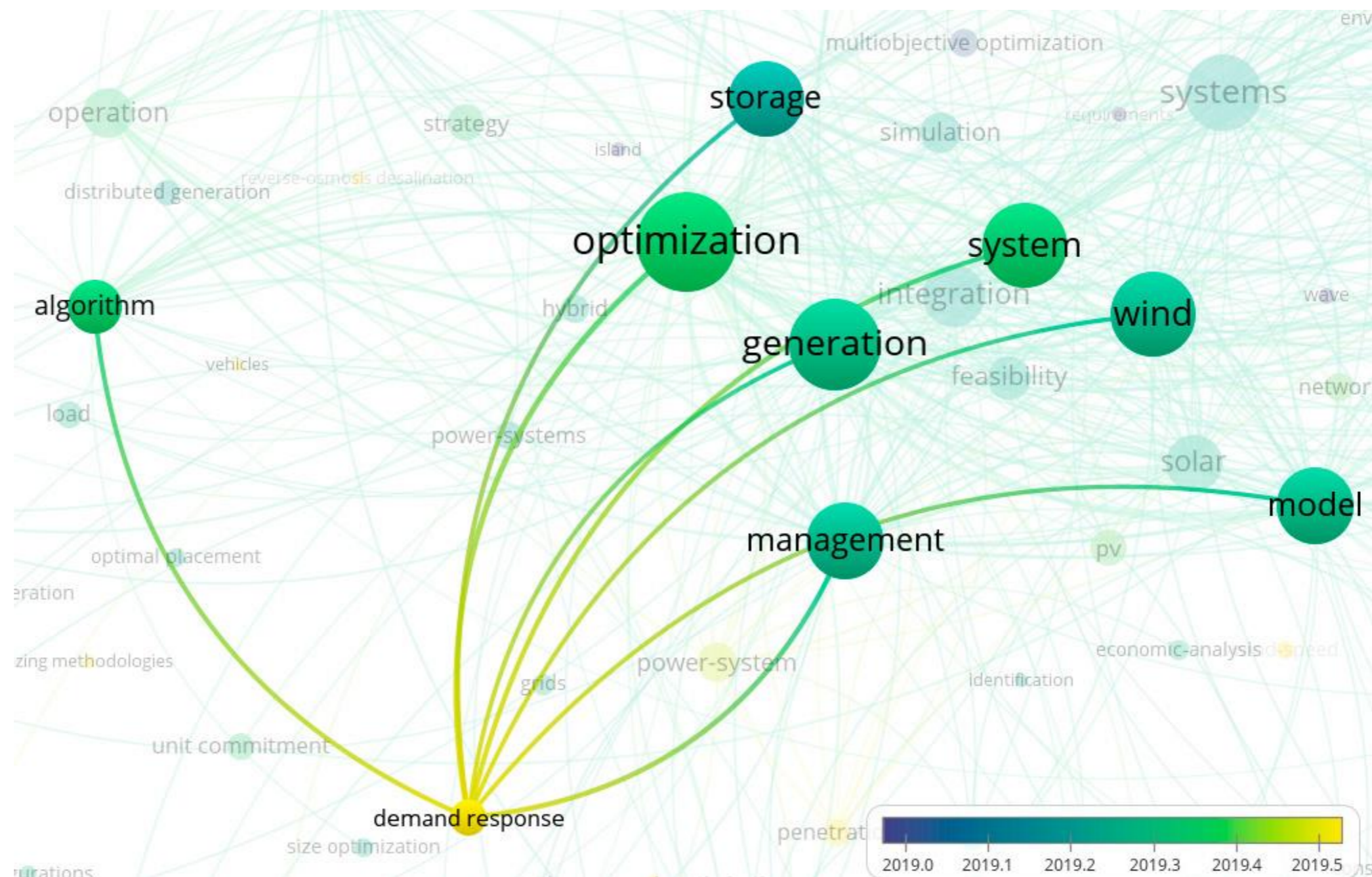


Рис. Б.4. Пример выделения нарождающейся тематики

Управление спросом – нарождающаяся тематика, которая отражает развитие систем управления генерацией в зависимости от спроса на энергоресурс, оптимизация работы таких систем требует как разработки моделей и алгоритмов управления, так и создания систем хранения, например, для ветровой энергетики.

Web of Science publications for 2019–2020 on clean energy issues: an analysis of subject areas

B.N. Chigarev

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: bchigarev@ipng.ru

Abstract. A brief discussion on the Clean Energy Transitions Programme is presented. The keywords of 2256 publications indexed in the Web of Science abstract database for the period 2019–2020 are analyzed. It is shown that the dominant keywords describe well the subject area under review related to renewable energy, its optimization, carbon dioxide emission, energy generation and storage, specific types of renewable energy, economic growth, innovation, efficiency, demand and sustainability. In doing so, authors are more likely to use more general terms to classify their publications, and keywords plus of the Web of Science platform are more likely to describe specific processes related to the transition to clean energy. Basing on keyword clustering, 5 sustainable sub-themes in the clean energy theme are identified. It is demonstrated that bibliometric analysis can be used to highlight emerging topics.

Keywords: Clean Energy Transition Programme, International Energy Agency, keywords, clustering, co-occurrence, bibliometric analysis, Web of Science abstract database.

Citation: Chigarev B.N. Web of Science publications for 2019–2020 on clean energy issues: an analysis of subject areas // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 111–132. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art9> (In Russ.).

References

1. Special report on clean energy innovation. Accelerating technology progress for a sustainable future. IEA report, July 2020. 185 p. <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation> (Accessed on 10.07.2020).
2. Nuclear power in a clean energy system. IEA report, May 2019. 103 p. <https://webstore.iea.org/download/direct/2779> (Accessed on 10.07.2020).
3. World energy investment 2020. IEA report, May 2020. 207 p. <https://webstore.iea.org/download/direct/3003> (Accessed on 10.07.2020).
4. van Eck N.J., Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping // *Scientometrics*. 2009. Vol. 84, No. 2. P. 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
5. Aria M., Cuccurullo C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis // *Journal of Informetrics*. 2017. Vol. 11, No. 4. P. 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
6. Shkiperova G.T. The environmental Kuznets curve as a tool for regional development research // *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2013. No. 19. P. 8–16. <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-krivaya-kuznetsa-kak-instrument-issledovaniya-regionalnogo-razvitiya> (Accessed on 10.07.2020). (In Russ.).
7. Li D., Wang Z., Wang L., Sohn S., Shen F., Murad M.H., Liu H. A text-mining framework for supporting systematic reviews // *American Journal of Information Management*. 2016. Vol. 1, No. 1. P. 1–9. <http://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=105&doi=10.11648/j.infomgmt.20160101.11> (Accessed on 10.07.2020).

8. *Blankson S.K.K.* Past, present and future as time in the age of science. 2nd ed. London: Blankson Enterprises Ltd., 2016. 212 p.
9. *Breit W., Culbertson W.P., Jr.* Science and ceremony: The institutional economics of C. E. Ayres. Austin: University of Texas Press, 2014. 228 p.
10. *Child M., Kemfert C., Bogdanov D., Breyer C.* Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe // *Renewable Energy*. 2019. Vol. 139. P. 80–101. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.077>
11. *Tafarte P., Eichhorn M., Thrän D.* Capacity expansion pathways for a wind and solar based power supply and the impact of advanced technology – A case study for Germany // *Energies*. 2019. Vol. 12, No. 2. P. 324. <https://doi.org/10.3390/en12020324>
12. *Gabrielli P., Fürer F., Mavromatidis G., Mazzotti M.* Robust and optimal design of multi-energy systems with seasonal storage through uncertainty analysis // *Applied Energy*. 2019. Vol. 238. P. 1192–1210. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.064>
13. *Zhang G., Shen Z., Wang L.* Online energy management for microgrids with CHP co-generation and energy storage // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2020. Vol. 28, No. 2. P. 533–541. <https://doi.org/10.1109/tcst.2018.2873193>
14. *Huang J., Fan J., Furbo S.* Feasibility study on solar district heating in China // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 108. P. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.014>
15. *Aberilla J.M., Gallego-Schmid A., Stamford L., Azapagic A.* Design and environmental sustainability assessment of small-scale off-grid energy systems for remote rural communities // *Applied Energy*. 2020. Vol. 258. P. 114004. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114004>
16. *Sharma S., Basu S., Shetti N.P., Aminabhavi T.M.* Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 713. P. 136633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>
17. *Mortensen A.W., Mathiesen B.V., Hansen A.B. et al.* The role of electrification and hydrogen in breaking the biomass bottleneck of the renewable energy system – A study on the Danish energy system // *Applied Energy*. 2020. Vol. 275. P. 115331. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115331>
18. *Vo A.T., Vo D.C., Le Q.T.* CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth: new evidence in the ASEAN countries // *Journal of Risk and Financial Management*. 2019. Vol. 12, No. 3. P. 145. <https://doi.org/10.3390/jrfm12030145>
19. *Yang X.J., Hu H., Tan T., Li J.* China's renewable energy goals by 2050 // *Environmental Development*. 2016. Vol. 20. P. 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2016.10.001>
20. Demand response on the Russian market: barriers and prospects. VYGON Consulting. December 2018. 58 p. http://vygon.consulting/upload/iblock/7c7/vygon_consulting_dr.pdf (Accessed on 10.07.2020). (In Russ.).
21. *Siano P., De Marco G., Rolan A., Loia V.* A survey and evaluation of the potentials of distributed ledger technology for peer-to-peer transactive energy exchanges in local energy markets // *IEEE Systems Journal*. 2019. Vol. 13, No. 3. P. 3454–3466. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2903172>
22. *Etukudor C., Couraud B., Robu V. et al.* Automated negotiation for peer-to-peer electricity trading in local energy markets // *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 920. <https://doi.org/10.3390/en13040920>