

ЭЛЕКТРОННАЯ СЕРИЯ «НАУКИ О ЗЕМЛЕ»

научного рецензируемого журнала

«ВЕСТНИК СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени М.К. АММОСОВА»

Сетевое научное периодическое издание

Издается с 2016 года

Издание выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»

№ 2(26) 2022

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор

А.Н. Николаев, д. б. н.

Заместитель главного редактора, редактор серии

Ю.Г. Данилов, к.г.н., проф.

Выпускающий редактор

В.Ю. Кузин, к.г.н.

Члены редакционной коллегии:

Г.А. Анциферова, д.г.н., *З.В. Атаев*, к.г.н., *Л.М. Ахромеев*, к.г.н., *А.А. Верчеба*, д.г.-м.н.,
А.Я. Григорьевская, д.г.н., *М.Н. Железняк*, д.г.-м.н., *М.М. Иудин*, к.т.н., *И.И. Ковлеков*, д.т.н.,
О.М. Кривошапкина, д.п.н., *С.А. Куропан*, д.г.н., *Я.Б. Легостаева*, к.б.н., *В.С. Марков*, к.т.н.,
В.Б. Михно, д.г.н., *В.В. Нескоромных*, д.т.н., *Ю.А. Нестеров*, к.г.н., *З.С. Никифорова*, д.г.-м.н.,
А.П. Пестерев, к.б.н., *Л.И. Полуфунтикова*, к.г.-м.н., *М.Ю. Присяжный*, д.г.н., *Н.А. Пуляев*, к.г.-
м.н., *А.Н. Саввинова*, к.г.н., *Н.В. Соловьев*, д.т.н., *В.Ю. Фридовский*, д.г.-м.н., *В.И. Часовский*,
д.г.н., *Х.Г. Асадов*, д.т.н., НИИ Аэрокосмической техники, г. Баку, Азербайджан, *Ж.-Л. Балэ*,
проф., университет Aix Marseille (Экс Марсель), Франция, *С. Ж.-П. Гадалэ*, д.г.н., проф., уни-
верситет Aix Marseille (Экс Марсель), Франция, *Я. Колейка*, д.г.н., проф., университет Мазарик,
г. Брно, Чехия, *В. Уэргэми*, PhD, университет Aix Marseille (Экс Марсель), Франция.

Адрес учредителя и издателя: 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58

Адрес редакции: 677000, г. Якутск, ул. Курашова, 30/4.

Тел./факс: (4112) 32-16-79

Северо-Восточный федеральный университет

<http://s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/unir/vestnik-svfu/>

VESTNIK OF NORTH-EASTERN FEDERAL UNIVERSITY
“EARTH SCIENCES” SERIES

Network scientific periodical

Published since 2016

The frequency of publication is 4 times a year

The founder and publisher is Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“The M.K. Ammosov North-Eastern Federal University”

№ 2(26) 2022

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Editor-in-Chief

A.N. Nikovaev, Doctor of Biological Sciences

Deputy Editor-in-Chief, Editor of the Series:

Yu. G. Danilov, Candidate of Geographic Sciences, Professor

Commissioning Editor

V. Yu. Kuzin, Candidate of Geographic Sciences

Members of the Editorial Board of the Series:

G.A. Antsiferova, Dr. of Geographic Sciences, *Z.V. Ataev*, Cand. of Geographic Sciences, *L.M. Akhromeev*, Cand. of Geographic Sciences, *A.A. Vercheba*, Dr. of Geological and Minerological Sciences, *A.Ya. Grigorievskaya*, Dr. of Geographic Sciences, *M.N. Zhelezniak*, Dr. of Geological and Minerological Sciences, *M.M. Iudin*, Cand. of Engineering Sciences, *I.I. Kovlekov*, Dr. of Engineering Sciences, *O.M. Krivochapkina*, Dr. of Pedagogical Sciences, *S.A. Kurolap*, Dr. of Geographic Sciences, *I.B. Legostaeva*, Cand. of Biological Sciences, *V.S. Markov*, Cand. of Engineering Sciences, *V.B. Mikhno*, Dr. of Geographic Sciences, *V.V. Neskoromnykh*, Dr. of Engineering Sciences, *Yu.A. Nesterov*, Cand. of Geographic Sciences, *Z.S. Nikiforova*, Dr. of Geological and Minerological Sciences, *A.P. Pesterev*, Cand. of Biological Sciences, *L.I. Polufuntikova*, Cand. of Geological and Minerological Sciences, *M.Yu. Prisyazhniy*, Dr. of Geographic Sciences, *N.A. Puliaev*, Cand. of Geological and Minerological Sciences, *A.N. Savvinova*, Cand. of Geographic Sciences, *N.V. Soloviev*, Dr. of Engineering Sciences, *V.Yu. Fridovsky*, Dr. of Geological and Minerological Sciences, *VI Chasovsky*, Dr. of Geographic Sciences, *H.G. Asadov*, Dr. of Engineering Sciences, Research Institute of Aerospace Engineering, Baku, Azerbaijan, *Ballais Sebastien Jean-Louis*, Professor, University Aix Marseille, France, *Gadal Sebastien Jean-Paul*, Professor, University Aix Marseille, France, *Kolejka Jaromir*, Masaryk University, Professor, Brno, Ceska Republika, *Ouerghemmi Valid*, PhD, University Aix Marseille, France

Founder and publisher address: the North-Eastern Federal University, 677000, Yakutsk, ul. Belinskogo, 58.

Editors Office address: the North-Eastern Federal University, 677000, Yakutsk, ul. Kurashova 30/4.

Telephone/Fax: (4112) 32-16-79

<http://s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/unir/vestnik-svfu/>

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ

Э.А. Абубакарова, А.А. Даукаев. Высокобалльные землетрясения тектонического происхождения: причины и прогноз (на примеретерритории Чеченской Республики)..... 5

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

И.И. Рожин, К.К. Аргунова. Моделирование подземного хранения природного газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах 10

П.К. Янец, С.А. Иванова, Ю.Г. Данилов. Использование Google Earth engine (GEE) и спутниковых снимков Landsat для определения характеристик лесных пожаров 22

ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТА

М.И. Захаров. Региональные особенности пространственной организации по главным бассейнам хребта Орулган..... 32

ГИДРОЛОГИЯ

И.И. Жирков, Т.П. Трофимова. Сапропелевые ресурсы озера Кубалах г. Якутска..... 39

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

В.Ю. Кузин. Регионополитизация в Дальневосточном федеральном округе: некоторые аспекты 47

CONTENT

GEOLOGY

- E.A. Abubakarova, A.A. Daukaev.* High-grade earthquakes of tectonic origin: causes and forecast: The case of the Chechen Republic..... 5

APPLIED RESEARCH

- I.I. Rozhin, K.K. Argunova.* Modeling natural gas underground storage in the hydrated state in permafrost aquifers 10
- P.K. Janiec, S.A. Ivanova, Y.G. Danilov.* Using Google Earth engine (GEE) and Landsat satellite images to detect forest fires..... 22

LANDSCAPE AND LANDSCAPE GEOCHEMISTRY

- M.I. Zakharov.* Regional features of the spatial organization in the main basins of the Orulgan Ridge..... 32

HYDROLOGY

- I.I. Zhirkov, T.P. Trofimova.* Sapropel resources of Lake Kubalakh, Yakutsk..... 39

ECONOMIC, SOCIAL, POLITICAL AND RECREATIONAL GEOGRAPHY

- V.Yu. Kuzin.* Regionopolization in the Far Eastern Federal District: Some aspects..... 47

— ГЕОЛОГИЯ —

УДК 551.24

DOI 10.25587/SVFU.2022.26.2.001

*Э.А. Абубакарова,^{1,2} А.А. Даукаев¹*¹ Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, г. Грозный, Россия² Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, Россия**ВЫСОКОБАЛЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ: ПРИЧИНЫ И ПРОГНОЗ
(на примере территории Чеченской Республики)**

Аннотация. Статья посвящена землетрясениям и сейсмичности, даны краткие сведения о становлении и развитии сейсмологии. Выделены три этапа формирования сейсмологии как науки: описательный – охватывающий вторую половину XIX, развитие сейсмологии в системе геологических наук и этап развития сейсмологии в системе физико-математических наук. Приведены отличительные особенности землетрясений от других природных катаклизмов, их классификации по различным признакам – по глубине очага, по механизму проявления и так далее. Отмечена связь землетрясений с разломно-блоковой структурой территории. Целью данной работы является представление общих сведений о землетрясениях, их типах, критериях сейсмичности, и в оценке современного состояния проблемы прогноза землетрясений. Основные методы заключаются в сравнительном анализе и обобщении теоретических данных и практических проявлений землетрясений в различных регионах и др. При изучении сейсмичности региона были использованы каталоги землетрясений, фондовые материалы и изданные научные труды. На примере изучения землетрясений в разных регионах отмечено, что сейсмичность их в основном связана со структурно-тектоническими особенностями территории. На основе изучения землетрясений, произошедших в разных регионах в XX в. констатируется их непредсказуемость и невозможность прогнозирования их очагов, времени и силы. Вместе с тем, в дальнейшем прогноз землетрясений не исключается при постоянном мониторинге с целью выявления аномальных явлений, организации, сбора, систематизации, анализа и обработки сейсмических данных, в том числе предвестников землетрясений.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясения, магнитуда, тектонические особенности, глубинные разломы.

АБУБАКАРОВА Элиза Ахметовна – к.г.-н., м.н, в.н.с КНИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д. Миллионщикова, г. Грозный. E-mail: eliza_ggni@mail.ru

АБУБАКАРОВА Элиза Ахметовна – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading researcher, Ibrahimov Comprehensive Research Institute, RAS, Millionshchikov Groznyi State Petroleum Technical University, Groznyi. E-mail: eliza_ggni@mail.ru

ДАУКАЕВ Арун Абалханович – д.г.-м.н., зав. отделом КНИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН. E-mail: Daykaev@mail.ru

ДАУКАЕВ Арун Абалханович – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of department, Ibrahimov Comprehensive Research Institute, RAS. E-mail: Daykaev@mail.ru

E.A. Abubakarova,^{1,2} A.A. Daukaev¹

¹ Ibrahimov Comprehensive Research Institute, RAS, Grozniy, Russia

² Millionshchikov Grozniy State Petroleum Technical University, Grozniy, Russia

HIGH-GRADE EARTHQUAKES OF TECTONIC ORIGIN: CAUSES AND FORECAST: The case of the Chechen Republic

Abstract. The article is devoted to earthquakes and seismicity, brief information about the formation and development of seismology is given. There are three stages in the formation of seismology as a science: descriptive; covering the second half of the 19th century; the development of seismology in the system of geological sciences; and the stage of development of seismology in the system of physical and mathematical sciences. Distinctive features of earthquakes from other natural disasters are given, their classification according to various criteria – according to the depth of the focus, according to the mechanism of manifestation, and so on. The connection of earthquakes with the fault-block structure of the territory is noted. The purpose of this work is to present general information about earthquakes, their types, seismicity criteria, and in assessing the current state of the problem of earthquake prediction. The main methods are comparative analysis and generalization of theoretical data and practical manifestations of earthquakes in different regions, etc. When studying the seismicity of the region, earthquake catalogs, stock materials and published scientific papers were used. On the example of the study of earthquakes in different regions, it was noted that their seismicity is mainly associated with the structural and tectonic features of the territory. Based on the study of earthquakes that occurred in different regions in the 20th century, their unpredictability and the impossibility of predicting their centers, time and strength are stated. At the same time, in the future, the forecast of earthquakes is not excluded with constant monitoring in order to identify anomalous phenomena, organize, collect, systematize, analyze and process seismic data, including earthquake precursors.

Keywords: seismicity, earthquakes, magnitude, tectonic features, deep faults.

Введение

Наука, изучающая землетрясения называется сейсмологией. В развитии сейсмологии различаются три периода. Первый период, в основном охватывающий вторую половину XX века, можно отметить как описательный. Основной задачей ее являлось описание внешних признаков проявлений землетрясений. В этот период сейсмология рассматривалась как часть физической географии. Основные исследования в России проводились Г.В. Абигом, С.П. Крашениниковым, И.В. Мушкетовым и др. С начала XX века начинается второй период развития сейсмологии, уже в системе геологических наук. Результатами исследований членов Геолкома и других геологических организаций (К.И. Багданович, Д.И. Мушкетов, А.П. Павлов, Ч. Дэвис, А. Зибберг) была установлена связь землетрясений с особенностями геологического строения. На третьем периоде своего развития сейсмология стала в большей степени тяготеть к физико-математическим наукам (Г.А. Гамбурцев, В.А. Магнитский, В.В. Федынский, Е.Ф. Саваренский и др.). Основы физико-математического направления сейсмологии были заложены Б.Б. Голицыным [1].

В энциклопедическом словаре дано такое определение землетрясений: «Подземные толчки и колебания земной поверхности, возникающие в результате внезапных смещений и разрывов в земной коре или в верхней части мантии и передающиеся на большие расстояния в виде упругих колебаний» [2]. В самом это определении можно заметить некоторые характерные черты присущие землетрясениям, которыми они отличаются от других природных катаклизмов. Именно, внезапностью, быстротечностью и охватом больших территорий они отличаются от других природных стихийных бедствий. И эти особенности, по-видимому, являются причинами того факта, что они находятся на одном из первых мест среди природных бедствий по числу жертв и разрушений.

Типы землетрясений и сейсмичность отдельных регионов

Как известно, зарождение землетрясений происходит в относительно небольшом пространстве называемом очагом. Центр очага землетрясения именуется фокусом, проекция которого на поверхность земли называется эпицентром. По глубине очага землетрясение делится на поверхностные, нормальные, промежуточные и глубокофокусные [3]. По механизму происхождения различаются землетрясения денудационной, вулканической и тектонической природы [4].

В последнее время в литературе все чаще упоминается о еще одной разновидности землетрясения – так называемых антропогенных (техногенных) землетрясениях, связанных с инженерной деятельностью человека (эксплуатация нефтяных и газовых месторождений, заполнение глубоких водохранилищ и т.д.). К такой разновидности относится и Грозненское землетрясение 1971 г., спровоцированное интенсивной нефтедобычей в конце 1960-х и в начале 1970 гг. Денудационные землетрясения, очаг которых находится обычно на небольшой глубине или на поверхности земли могут быть связаны с обвалами горных сооружений, крупных пещер и т.д.

Вулканические землетрясения связаны с подземными взрывами в районах активизации вулканов. Землетрясения последних двух видов составляют очень незначительную долю в общем количестве землетрясений. Наибольшее распространение получили землетрясения тектонического происхождения. Именно на последних акцентируется внимание в данной статье. По результатам многолетних исследований сейсмичности в разных регионах мира установлена ее связь с тектоническими особенностями в частности с разломно-блоковой структурой, приуроченность очагов землетрясений к активным глубинным разломам. Имеются единичные случаи, когда разрыв в земной коре выходит на поверхность [5].

Чтобы понять природы землетрясений необходимо иметь представление о глубинном строении Земли. Наша планета состоит из трех оболочек: земная кора (верхняя оболочка), мантия и ядро.

В свою очередь континентальная Земная кора также имеет трехслойное строение: осадочный, гранитный и базальтовый. Крупнейшими элементами земной коры являются геосинклинали – области высокой тектонической активности и платформы – устойчивые области спокойного развития. В процессе развития геосинклиналей между ними и смежными платформенными областями закладываются так называемые краевые прогибы. Перечисленные и другие структурные элементы отделяются друг от друга глубинными разломами. Этими разломами расчленены на отдельные блоки структурные элементы Земной коры. Все это определяет блоковое строение Земной коры в целом. В зонах сочленения крупных блоков Земной коры постепенно накапливается напряжение. В момент, когда напряжение превышает силу трения, препятствующую перемещению блоков, происходит резкое смещение блоков с разгрузкой накопившихся напряжений, которые вызывают землетрясения [4]. Некоторые исследователи, природу глубокофокусных тектонических землетрясений приходящихся на периферии Тихого океана и других регионов, объясняют с позиции тектоники литосферных плит. Согласно которой в зонах глубоководных желобов по наклонно погружающимся глубинным разломам происходят подвижки океанического дна под континентальную. Вдоль плоскости разлома до глубины 700 км располагаются очаги землетрясений. М.В. Гзовский и др. исследователи разработали геологические критерии сейсмичности территории. Г.И. Рейснер [6] объединил геологические критерии сейсмичности в три группы:

- 1) предопределяющая принадлежность региона к категории сейсмичных (большая интенсивность проявления новейших и современных тектонических движений);
- 2) определяющее свойство среды (принадлежность региона к области завершенной палеозойской складчатости – Кавказ и др.);
- 3) определяющее место возникновения сильных землетрясений (многочисленный класс продольных и поперечных разрывных нарушений в земной коре, а так же признаки их присутствия – зоны контрастных сочленений крупных структурных комплексов различного ранга, места пересечений, дизъюнктивные узлы различной категории.

Используя в качестве критерии сейсмичности узлы пересечения разноориентированных разломов, их активность в новейшее время и др. на Кавказе выделены пять категорий относительной сейсмичности территорий [6]. К первой наиболее опасной в отношении сейсмичности отнесены «узлы пересечения активных в новейшее время продольных глубинных разломов с флексурами первого порядка, ограничивающие наиболее крупные поперечные поднятия». Участки первой категории находятся в южной части Малого Кавказа, в зоне сочленения Большого Кавказа с Предкавказьем, в Шемахенском районе Большого Кавказа и районе Черноморского побережья.

Участки второй категории располагаются в восточной части Малого Кавказа, в южной и северной частях Восточного Кавказа. В зонах первой и второй категории сейсмичности в настоящее время зарегистрированы землетрясения с магнитудой равной 6-7 (Шемахинское, Ахалкалакское, Спитакское, Дагестанское и др.).

К третьей категории отнесены зоны активных в новейшее время тектонических нарушений различного направления находящиеся вне узлов их пересечения. Участки третьей категории выделены на северо-западе Кавказа и в других районах.

К зонам четвертой и пятой категории отнесены участки, где не установлены достаточно надежные геологические критерии сейсмичности (отдельные участки Северо-Западного Кавказа и Восточного Предкавказья).

Сейсмическая активность территории Чеченской Республики

Территория Чеченской Республики (ЧР) в тектоническом отношении, занимающая центральную часть Терско-Каспийского прогиба относят к зонам высокой сейсмической активности.

К наиболее сильным землетрясениям, зарегистрированных на территории Чеченской Республики в прошлом и в текущем столетиях с силой 6 баллов и выше, относятся: 8-ми балльное Терское (Эльдаровское) землетрясение 1912 г.; 7-8 балльное Веденское 1933 г.; 7-ми балльные Аргунские землетрясения 1928 г. и 1966 г. 6-ти балльное Гудермесское 1950 г. 6-7-ми балльное Ачхой-Мартановское 1969 г.; 7-ми балльное Старогрозненское 1971 г.; 6-ти балльное Октябрьское 1972 г.; 8-9 балльное Черногорское землетрясение 1976 г., 8-ми балльное Курчалоевское землетрясение 2008 г. [7-9].

Наименьшей глубиной характеризуются Старогрозненское (1971 г.) и Октябрьское (1972 г.) землетрясения, имеющие доказанную техногенную природу [3], связанную с интенсивной и во многом нерациональной добычей нефти на одноименных месторождениях.

Возможный прогноз сильных землетрясений

Многолетний опыт наблюдений в различных сейсмоопасных регионах России и зарубежья показывает, что перед подготовкой сильных землетрясений происходит какие-то изменения в земной коре и на поверхности земли. Есть много случаев, когда перед землетрясениями происходили аномальные движения земной поверхности [10]. Вместе с тем отмечают еще больше случаев, когда аномальные движения земной поверхности не сопровождалась с землетрясениями. В последнее время в качестве предвестников землетрясений широко начали использовать изменения уровня и химического состава грунтовых вод, изменения геомагнитного поля и др.

Известный сейсмолог Н. Шебалин отмечает, что созревание отдельных сейсмических очагов может быть замечено заранее, но другие очаги известных нам геофизических полях внятно не проявляются [5].

Говоря о Спитакском землетрясении он далее отмечает, что здесь как раз был тот случай, когда созревание очага можно было заметить при своевременной организации, сбора и анализа предвестника землетрясений. Мировой опыт (Япония, Китай и др.) показывает, что для успешного долгосрочного и краткосрочного прогноза землетрясений необходимы постоянные наблюдения с целью выявления аномальных явлений [5].

Заключение

Таким образом, сейсмичность любого региона мира в основном связана со структурно-тектоническими особенностями, с системой глубинных разломов, в которых действуют множество механизмов – миграция флюидных потоков, механические явления и химические процессы, что в целом создают их устойчивость. По мнению многих исследователей, землетрясения до настоящего времени характерна непредсказуемость, т.е. нет возможности прогнозирования их места, времени и силы, в связи с хаотической, нелинейной природы процессов предшествующих землетрясениям.

Литература

1. Общая геология / под ред. Г.Д. Аджигиря и др. – М.: Просвещение, 1974. – 479 с.
2. Большой энциклопедический словарь. – М.: Норинт, 2002. – 1456 с.
3. Смирнова М.Н. Основы геологии СССР. – М.: Высшая школа, 1984. – 384 с.
4. Арабаджи М.С., Мильничук В.С. Тайны земных глубин. – М.: Недра, 1983. – 136 с.
5. Шебалин Н.В. Сильные землетрясения. Избранные труды. – М.: Издательство Академии горных наук, 1997. – 542 с.
6. Геологические методы оценки сейсмической опасности. – М. Недра, 1980.
7. Керимов И.А. Сильные землетрясения на территории чеченской республики / И.А. Керимов, М.Я. Гайсумов // Вестник Академии наук Чеченской Республики. – 2010. – № 1(12). – С. 57-62.
8. Гайсумов М.Я., Абубакарова Э.А., Ахматханов Р.С., Бадаев С.В. Разломная тектоника, геофизические поля и сейсмичность Чеченской Республики // Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе. Сборник трудов конференции. – Владикавказ: Владикавказский научный центр РАН, 2015. – С. 22–30.
9. Абубакарова Э.А. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Терско-Каспийского прогиба // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений. Тезисы докладов и программа Всероссийской научной конференции с международным участием. Под редакцией Некрасовой А.К. – М., 2019. – С. 9-10.
10. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. – М.: Наука, 1993. – 313 с.

References

1. Obshchaya geologiya / pod red. G.D. Azhgireya i dr. – M.: Prosveshchenie, 1974. – 479 s.
2. Bol'shoj enciklopedicheskij slovar'. – M.: Norint, 2002. – 1456 s.
3. Smirnova M.N. Osnovy geologii SSSR. – M.: Vysshaya shkola, 1984. – 384 s.
4. Arabadzhi M.S., Mil'nichuk V.S. Tajny zemnyh glubin. – M.: Nedra, 1983. – 136 s.
5. Shebalin N.V. Sil'nye zemletryaseniya. Izbrannye trudy. – M.: Izdatel'stvo Akademii gornyh nauk, 1997. – 542 s.
6. Geologicheskie metody ocenki sejsmicheskoy opasnosti. – M. Nedra, 1980.
7. Kerimov I.A. Sil'nye zemletryaseniya na territorii chechenskoj respubliky / I.A. Kerimov, M.YA. Gajsumov // Vestnik Akademii nauk CHEchenskoj Respubliki. – 2010. – № 1(12). – S. 57-62.
8. Gajsumov M.YA., Abubakarova E.A., Ahmathanov R.S., Badaev S.V. Razlomnaya tektonika, geofizicheskie polya i sejsmichnost' CHEchenskoj Respubliki // Geodinamika, vulkanizm, sejsmichnost' i ekzogennye geologicheskie processy prirodnogo i tekhnogennogo haraktera na Kavkaze. Sbornik trudov konferencii. – Vladikavkaz: Vladikavkazskij nauchnyj centr RAN, 2015. – S. 22–30.
9. Abubakarova E.A. Geofizicheskie polya, glubinnoe stroenie i sejsmichnost' Tersko-Kaspijskogo progiba // Sovremennye metody ocenki sejsmicheskoy opasnosti i prognoza zemletryasenij. Tezisy dokladov i programma Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Pod redakciej Nekrasovoj A.K. – M., 2019. – S. 9-10.
10. Sobolev G.A. Osnovy prognoza zemletryasenij. – M.: Nauka, 1993. – 313 s.

— ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ —

УДК 622.691.24:622.279.72
DOI 10.25587/SVFU.2022.26.2.002*И.И. Рожин, К.К. Арзунова¹*Институт проблем нефти и газа СО РАН, Федеральный исследовательский центр
«Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск, Россия**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНОГО ХРАНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА
В ГИДРАТНОМ СОСТОЯНИИ В ПОДМЕРЗЛОТНЫХ
ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТАХ**

Аннотация. В работе приведены результаты вычислительного эксперимента, направленного на получение критериев выбора геологических структур для создания подземного хранилища природного газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах. Преимущества такого способа подземного хранения газа заключаются в большей компактности и стабильности хранилища, т.к. газ в гидратном состоянии занимает гораздо меньший объем, чем в свободном состоянии при тех же температуре и давлении. Представлена математическая модель закачки газа через одиночную скважину в горизонтальный водоносный пласт, в которой учтены все основные физические и термодинамические особенности процесса гидратообразования, в том числе сжимаемость газа, эффект Джоуля-Томсона, адиабатическое расширение, неизотермическая фильтрация воды и газа, массообмен между газом, водой и гидратом. С помощью этой модели оценивается динамика распределения гидратонасыщенности, водонасыщенности, давления и температуры в водоносном пласте при различных значениях интенсивности закачки газа и фильтрационно-емкостных свойств пласта. Кроме пористости и проницаемости выбранный пласт (истощенный газовый или водоносный) характеризуется начальными значениями давления, температуры и водонасыщенности. Варьируемыми параметрами являются пористость пласта и объемный расход нагнетаемого газа. Результаты расчетов показали, что для создания подземных хранилищ газа в гидратном состоянии следует выбирать водоносные горизонты в зависимости от их коллекторских свойств и гидродинамических характеристик. В дальнейших исследованиях необходимо оценить тепловое взаимодействие таких хранилищ с окружающими горными породами. Для этого предложенную математическую модель следует обобщить в двумерной постановке. Полученные результаты и математическая модель могут быть использованы при разработке научных основ технологии подземного хранения не только природного газа, но и попутного нефтяного газа, а также парниковых и токсичных газов в гидратном состоянии.

Ключевые слова: подземное хранение, природный газ, гидратообразование, неизотермическая фильтрация, подмерзлотный водоносный горизонт, вычислительный эксперимент.

РОЖИН Игорь Иванович – д.т.н., доцент, г.н.с. Институт проблем нефти и газа СО РАН, ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН». E-mail: i_rozhin@mail.ru

ROZHIN Igor Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch, RAS, Yakut Scientific Center, SB, RAS. E-mail: i_rozhin@mail.ru

АРГУНОВА Кира Константиновна – к.ф.-м.н., с.н.с. Институт проблем нефти и газа СО РАН, ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН». E-mail: a_kira@mail.ru

ARGUNOVA Kira Konstantinovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Oil and Gas Problems, SB, RAS, Yakut Scientific Center, SB, RAS. E-mail: a_kira@mail.ru

I.I. Rozhin, K.K. Argunova

Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Federal Research Center «Yakut Scientific Center SB RAS»,
Yakutsk, Russia

MODELING NATURAL GAS UNDERGROUND STORAGE IN THE HYDRATED STATE IN PERMAFROST AQUIFERS

Abstract. The paper presents the results of a computational experiment aimed at obtaining criteria for the selection of geological structures for the creation of a natural gas underground storage in the hydrated state in permafrost aquifers. The advantages of this method of underground gas storage are greater compactness and stability of the storage, because the gas in the hydrated state occupies a much smaller volume than in the free state at the same temperature and pressure. A mathematical model of gas injection through a single well into a horizontal aquifer is presented, which takes into account all the basic physical and thermodynamic features of the process under consideration, including gas compressibility, the Joule-Thomson effect, adiabatic expansion, non-isothermal filtration of water and gas, mass transfer between gas, water and hydrate. This model is used to estimate the dynamics of the distribution of hydrate saturation, water saturation, pressure and temperature in the aquifer at different intensity values of gas injection and filtration-capacitance properties of the reservoir. In addition to porosity and permeability, the selected reservoir (depleted gas or aquifer) is characterized by initial values of pressure, temperature and water saturation. The variable parameters are the reservoir porosity and the volume flow rate of the injected gas. The results of the calculations showed that aquifers should be chosen for the creation of underground gas storage facilities in a hydrated state, depending on their reservoir properties and hydrodynamic characteristics. In further studies, it is necessary to evaluate the thermal interaction of such storages with the surrounding rocks. To do this, the proposed mathematical model should be generalized in a two-dimensional formulation. The results obtained and the mathematical model can be used to develop the scientific foundations of underground storage technology not only for natural gas, but also for associated petroleum gas, as well as greenhouse and toxic gases in a hydrate state.

Keywords: underground storage, natural gas, hydrate formation, non-isothermal filtration, permafrost aquifer, computational experiment.

Введение

Актуальность исследований возможности подземного хранения природного газа определяется необходимостью повышения надежности и эффективности систем энергоснабжения в северных регионах, включающих Республику Саха (Якутия), для которой природный газ является одним из основных источников энергии. Для регионов с суровыми климатическими условиями газ в таких хранилищах может также служить резервом при возникновении аварийных ситуаций на месторождении или на трассе магистрального газопровода. В этих регионах, характеризующихся наличием многолетней мерзлоты, имеются термодинамические предпосылки для хранения газа в гидратном состоянии [1–5] в подмерзлотных водоносных горизонтах, т.е. в твердой фазе, которая образуется при закачке природного газа в пористые коллекторы при определенных термодинамических условиях (при определенных соотношениях между температурой и давлением, зависящих от компонентного состава газа, типа и минерализации пластовых вод) из воды (водного раствора, льда, водяных паров) и низкомолекулярных газов. Преимущества такого способа хранения заключаются в большей компактности и стабильности хранилища, т.к. газ в гидратном состоянии занимает гораздо меньший объем, чем в свободном состоянии при тех же температуре и давлении (в одном объеме гидрата может содержаться до 170 объемов газа), и кроме того, при переходе в гидратное состояние связывается вся свободная пластовая вода. Следовательно, создание таких хранилищ газа будет способствовать многократному снижению объема хранилищ и повышению их стабильности по сравнению с обычными подземными хранилищами, а подошва многолетнемерзлых пород будет служить естественным непроницаемым для газа экраном. Более того, небольшая глубина таких хранилищ позволит существенно снизить затраты на их сооружение.

Оценка возможности создания подземных хранилищ газа в гидратном состоянии и, соответственно, подготовка их технологического проекта должны быть основаны на современных научных достижениях соответствующих разделов механики жидкости и газа, тепломассообмена, физико-химии газовых гидратов, а также – вычислительной математики.

В последние годы заметно растет интерес к математическому моделированию образования газовых гидратов в пористых средах. В частности, это связано с тем, что увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере, вызванное антропогенной деятельностью, негативно сказывается на биосфере Земли и одним из важных направлений подземного хранения газа является захоронение диоксида углерода в пористых коллекторах в газогидратном состоянии.

Следует отметить работы российских ученых [6–8], в которых сформулированы и доказаны необходимые условия формирования фронтальной и протяженной зон образования гидрата при закачке газа в насыщенный газом и водой пласт. Так, одна из глав монографии [6] посвящена теоретическому изучению процессов, происходящих в пористых структурах, насыщенных газом и водой, при закачке в них холодного газа. Построены аналитические решения задачи, описывающие распределение основных параметров в пласте. Установлены основные закономерности образования газогидратов в пористых пластах при нагнетании газа в зависимости от температуры закачиваемого газа, исходных параметров пористой среды, а также интенсивности закачки газа. Исследованы критические условия, разделяющие разные режимы, соответствующие гидратообразованию как с фронтальной поверхностью фазовых переходов, так и сформированием объемной области образования гидрата. На основе методов и уравнений механики многофазных сред в работе [9] построена математическая модель закачки газа в пласт, насыщенный газом и льдом. Учитывается образование газового гидрата на протяженной области и таяние льда. Рассматриваемая задача сводится к решению задачи нахождения трех подвижных границ фазовых переходов. Получены автомодельные решения задачи, описывающие распределение параметров (температуры, давления, насыщения фаз) в пласте.

В работах [10–13] исследуется процесс замещения метана в газовом гидрате диоксидом углерода при закачке CO_2 в пористую среду с целью подземного хранения CO_2 и добычи CH_4 . Построена модель, учитывающая как тепломассообмен в пористой среде, так и диффузионную кинетику процесса замещения. Проанализировано влияние коэффициента диффузии, проницаемости и протяженности пласта на время полного замещения газа в гидрате. Установлено, что при высоких значениях коэффициента диффузии в гидрате, низких значениях проницаемости пласта, а также при увеличении длины резервуара, процесс замещения будет происходить во фронтальном режиме, и будет ограничен, как правило, фильтрационным массопереносом. В противном случае замещение будет ограничено диффузией газа в гидрате.

В работах [6–13], а также в статьях [14–15], посвященных математическому моделированию образованию газовых гидратов в пористых коллекторах, использовались некоторые из следующих упрощающих допущений: 1) газ считается идеальным; 2) не учитывается зависимость равновесных условий образования гидратов от состава газовой смеси, от типа и степени минерализации пластовых вод; 3) пластовая вода считается неподвижной; 4) в уравнении энергии не учитываются адиабатическое расширение и эффект Джоуля-Томсона; 5) граничные условия ставятся таким образом, чтобы свести исходную задачу к автомодельной; 6) соответствующие дифференциальные уравнения решаются приближенными аналитическими методами.

В данной работе используется метод оценки возможности создания подземного хранилища природного газа в гидратном состоянии в подходящих с геологической точки зрения водоносных пластах (подмерзлотных горизонтах), предложенный в работах [16–19]. При этом в разработанной математической модели все вышеупомянутые допущения не используются.

Постановка задачи

В работах [16–19] была оценена концептуальная возможность подземного хранения природного газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах. Она основана

на использовании математической модели многофазной неизотермической фильтрации реального газа и воды [20], в которой химическая реакция гидратообразования происходит при температуре, существенно зависящей от давления газа в фильтрующемся потоке. В этой модели наиболее полно учтены основные физические особенности этого процесса: реальные свойства газа, эффект Джоуля–Томсона, совместное движение воды и газа в однородной пористой среде, массообмен между газом и водой с гидратом. При этом используются модифицированные уравнения теории неизотермической многофазной фильтрации, которые выводятся на основе фундаментальных законов сохранения массы и энергии. В качестве уравнений движения используется обобщенный закон фильтрации Дарси для движущихся фаз, коэффициенты проницаемости в котором являются функциями насыщенности соответствующей фазой [21]. Замыкающие математическую модель соотношения: уравнение состояния реального газа; зависимости фазовых проницаемостей от соответствующих насыщенностей; зависимость температуры гидратообразования от давления газа, коэффициенты которой являются функциями компонентного состава природного газа и типа и минерализации пластовых вод.

Рассмотрение задачи выполнено для модельной осесимметричной задачи нагнетания газа через одиночную скважину в горизонтальный водоносный пласт, кровля и подошва которого непроницаемы и теплоизолированы. Считается, что течение газа происходит в пласте, изначально насыщенном водой, либо водой вместе с газом. Скелет пористой среды недеформируемый, газ находится только в газообразном и гидратном, вода – только в жидком и гидратном состояниях, то есть, образования льда, и пара не происходит.

В работах [22–23] показано, что доля теплопроводности в общем балансе переноса тепла пренебрежимо мала по сравнению с конвекцией, что позволяет в уравнении энергии принять равной нулю кондуктивную составляющую. Тогда, выведенное на основе фундаментальных законов гидромеханики многофазных сред [24–25] с учетом обобщенного закона Дарси, уравнение энергии существенно упрощается. При этом вместо условия непроницаемости (отсутствие притока газа) на контуре пласта, использованного в работах [16–18], в данной работе как в работе [19] задается условие течения воды за пределами границы хранилища.

Приведем полную систему дифференциальных уравнений начально-краевой задачи образования гидратов при нагнетании газа в однородный пористый пласт, изначально насыщенный газом и водой [16–19]:

$$(\rho c)_e \frac{\partial T}{\partial t} - m q \rho_h \frac{\partial v}{\partial t} - m(1 - v - \sigma) \left(1 + \frac{T}{z} \frac{\partial z}{\partial T} \right) \frac{\partial p}{\partial t} - k(1 - v) \left(\rho_w c_w \frac{f_w}{\mu_w} + \right. \quad (1)$$

$$\left. + \rho_g c_g \frac{f_g}{\mu_g} \right) \frac{\partial p}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + k(1 - v) \rho_g c_g \frac{f_g}{\mu_g} \frac{RT^2}{c_p p} \frac{\partial z}{\partial T} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)^2 = 0,$$

$$m \frac{\partial}{\partial t} \left((1 - v - \sigma) \frac{p}{zT} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k(1 - v) f_g}{\mu_g} \frac{p}{zT} \frac{\partial p}{\partial r} \right) - m \rho_h \varepsilon R \frac{\partial v}{\partial t}, \quad (2)$$

$$m \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k(1 - v) f_w}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial r} \right) - m(1 - \varepsilon) \frac{\rho_h}{\rho_w} \frac{\partial v}{\partial t}, \quad (3)$$

$$p(r, 0) = p_0, \quad T(r, 0) = T_0, \quad v(r, 0) = v_0, \quad \sigma(r, 0) = \sigma_0, \quad (4)$$

$$T(r_b, t) = T_b, \quad p(r_b, t) = p_b(t) \quad \text{или} \quad 2\pi r_b H \frac{\rho_g}{\rho_n} \frac{k(1 - v) f_g}{\mu_g} \frac{\partial p(r_b, t)}{\partial r} = -Q, \quad (5)$$

$$-\frac{\partial p(r_k, t)}{\partial r} = \frac{f_w(p(r_k, t) - p_0)}{r_k \ln(r_{out}/r_k)}. \quad (6)$$

В математической модели приняты следующие обозначения: $(\rho c)_e = (1 - m)\rho_s c_s + m(1 - \nu - \sigma)\rho_g c_g + m\nu\rho_h c_h + m\sigma\rho_w c_w$ – эффективное значение объемной теплоемкости пористой среды, содержащей газ, гидрат и пластовую воду; c – удельная теплоемкость, f – фазовая проницаемость, H – мощность пласта, k – абсолютная проницаемость, m – пористость, p – давление, q – удельная теплота фазового перехода «газ+вода → гидрат», R – газовая постоянная, r – радиальная координата, r_b – наружный радиус скважины, r_k – радиус контура пласта, r_{out} – радиус гидродинамического влияния, T – температура, t – время, z – коэффициент сжимаемости, ε – содержание газа в единице объема гидрата, μ – динамическая вязкость, ρ – плотность, ρ_n – плотность газа при нормальных физических условиях, σ – водонасыщенность, ν – гидратонасыщенность. Нижние индексы величин означают $g, h, s, w, 0$ газ, гидрат, скелет пористой среды, вода и начальное состояние, соответственно.

Уравнения начально-краевой задачи замыкаются:

1) соотношениями для относительных фазовых проницаемостей газа и воды [24]

$$f_g(\sigma) = \begin{cases} \left(1 - \frac{\sigma}{0.9}\right)^{3.5} (1 + 3\sigma), & 0 \leq \sigma < 0.9, \\ 0, & \sigma \geq 0.9; \end{cases} \quad (7)$$

$$f_w(\sigma) = \begin{cases} \left(\frac{\sigma - 0.2}{0.8}\right)^{3.5}, & 0.2 < \sigma \leq 1, \\ 0, & 0 \leq \sigma \leq 0.2; \end{cases} \quad (8)$$

2) условием термодинамического равновесия «газ+вода → гидрат»

$$T = \alpha_1 \ln p + \alpha_2, \quad (9)$$

где α_1, α_2 – эмпирические константы, определяемые по экспериментальным данным или путем аппроксимации равновесных условий гидратообразования для газа данного состава с учетом типа и степени минерализации пластовых вод, которых можно вычислить по методикам [26–27];

3) уравнением состояния реального газа

$$\rho_g = p / zRT, \quad (10)$$

где зависимость коэффициента сжимаемости газа от давления и температуры определяется эмпирическим уравнением Латонова-Гуревича [28]: $z = (0.17376 \ln(T/T_c) + 0.73)^{p/p_c} + 0.1 p/p_c$.

Критические параметры газовой смеси можно определить по правилу Кейя [29]: $p_c = \sum_{i=1}^n y_i p_{ci}$,

$T_c = \sum_{i=1}^n y_i T_{ci}$, где p_{ci}, T_{ci}, y_i – критические давление и температура, молярная доля i -го компонента природного газа.

С помощью разработанной математической модели (1)–(10) и алгоритма численной реализации [16–19] оценивается динамика распределения гидратонасыщенности, водонасыщенности, давления и температуры в выбранном пласте, который характеризуется пористостью, проницаемостью и начальными значениями давления, температуры и водонасыщенности. Численное решение задачи проводится путем аппроксимации исходных уравнений и граничных условий экономичными конечно-разностными схемами, для реализации которых созданы алгоритмы, основанные на идеях реализации метода простых итераций и потоковой прогонки [30–31].

Анализ результатов вычислительного эксперимента

Результаты расчетов показали, что возможность создания подземных хранилищ газа в гидратном состоянии существенно зависит от коллекторских свойств и гидродинамических характеристик водоносных горизонтов. При этом время закачки газа в водонасыщенный коллектор на небольших глубинах, соответствующих подошве многолетней мерзлоты в центральной части Восточной Сибири, было ограничено 10 днями [16–18]. В данной работе, как в работе [19], это время увеличено до 100 дней, что соответствует реальному периоду снижения газопотребления летом. А также радиус контура питания увеличен от 100 м до 300 м.

В вычислительном эксперименте изучалось влияние пористости и проницаемости водоносного пласта и интенсивности закачки газа на динамику полей температуры, давления, водонасыщенности и гидратонасыщенности. Другие исходные параметры оставались неизменными, как в работах [16–19]: $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_s = 2650 \text{ кг/м}^3$, $\rho_h = 920 \text{ кг/м}^3$, $c_w = 4200 \text{ Дж/(кг}\times\text{К)}$, $c_s = 700 \text{ Дж/(кг}\times\text{К)}$, $c_h = 3210 \text{ Дж/(кг}\times\text{К)}$, $c_g = 2093 \text{ Дж/(кг}\times\text{К)}$, $q = 510 \text{ кДж/кг}$, $\varepsilon = 0.147$, $\mu_w = 1.8 \times 10^{-3} \text{ Па}\times\text{с}$, $\mu_g = 1.3 \times 10^{-5} \text{ Па}\times\text{с}$, $p_0 = 3 \times 10^6 \text{ Па}$, $T_0 = 274.15 \text{ К}$, $T_b = 279.15 \text{ К}$, $H = 10 \text{ м}$, $r_b = 0.1 \text{ м}$, $r_k = 300.1 \text{ м}$, $r_{out} = 1000.1 \text{ м}$. Состав закачиваемого природного газа, по которому вычислялись газовая постоянная, критическое давление и температура, эмпирические коэффициенты, входящие в соотношение (9), соответствовал Среднеботуобинскому нефтегазоконденсатному месторождению Республики Саха (Якутия): $\text{CH}_4 - 85.90$, $\text{C}_2\text{H}_6 - 7.32$, $\text{C}_3\text{H}_8 - 2.24$, $i\text{-C}_4\text{H}_{10} - 0.26$, $n\text{-C}_4\text{H}_{10} - 0.68$, $i\text{-C}_5\text{H}_{12} - 0.17$, $n\text{-C}_5\text{H}_{12} - 0.24$, $\text{C}_6\text{H}_{14} - 0.08$, $\text{CO}_2 - 0.05$, $\text{N}_2 - 2.64$, $\text{H}_2 - 0.14$, $\text{He} - 0.28$ (объемные доли, %); $R = 445.6 \text{ Дж/(кг}\times\text{К)}$, $p_c = 4.555 \times 10^6 \text{ Па}$, $T_c = 204.134 \text{ К}$, $\alpha_1 = 7.82 \text{ К}$, $\alpha_2 = 166.64 \text{ К}$.

Варьируемые параметры: расход закачиваемого газа ($1 \text{ м}^3/\text{с}$ и $5 \text{ м}^3/\text{с}$) и различные комбинации пористости и проницаемости пласта. В начальный момент водоносный пласт не содержит гидратов и его водонасыщенность равна 0.9. В работе [19] представлены результаты численных расчетов при комбинациях: 1 – $m = 0.15$, $k = 8 \times 10^{-13} \text{ м}^2$; 2 – $m = 0.15$, $k = 8 \times 10^{-14} \text{ м}^2$.

В работах [16–19] получено, что проницаемость коллектора должна быть выше 10^{-14} м^2 , чтобы при больших темпах закачки не допустить чрезмерного роста давления, которое может привести к потере герметичности кровли и подошвы коллектора. Тем самым, в этой работе были рассмотрены комбинации при одной и той же проницаемости $k = 8 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ и следующих значениях пористости: 1) $m = 0.5$, 2) $m = 0.4$.

Начнем с рассмотрения динамики полей температуры газа из-за её определяющей роли в образовании гидратов. Из рис. 1 видно, что за сравнительно небольшое время (несколько часов) температура газа существенно повышается: в случае высокой пористости при большом расходе – на 14 К, а при малой – на 11 К. После 10 дней нагнетания газа температурный фронт достигает расстояний 108 м и 205 м, через 49 и 18 дней – границу пласта, соответственно, при малом и большом расходе газа. В конце нагнетания газа температура почти выравнивается по всему пласту. Рис. 1 иллюстрирует все эти особенности и показывает влияние пористости на скорость перемещения температурного фронта и на динамику распределения температуры.

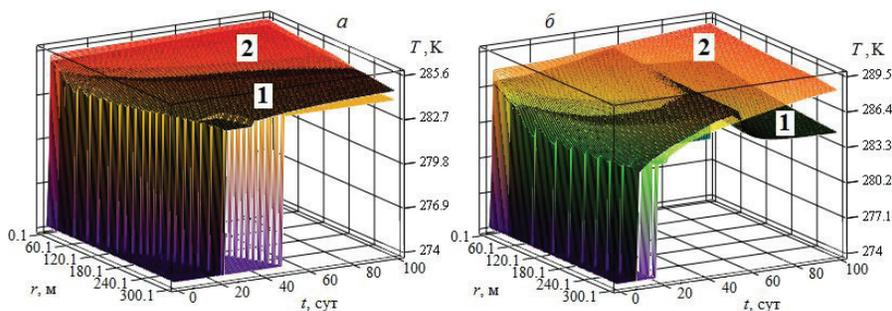


Рис. 1. Динамика температурных полей при расходе газа: а – $1 \text{ м}^3/\text{с}$; б – $5 \text{ м}^3/\text{с}$ (цифры на поверхностях соответствуют пористости: 1 – 0.15, 2 – 0.4)

Величина пористости также влияет на динамику и распределение давления в хранилище (см. поверхности 1 и 2 на рис. 2). Вблизи нагнетательной скважины давление растет с той же скоростью, что и температура. Но при малом расходе оно почти достигает своего предела 4 МПа, в то время как при большом расходе оно увеличивается постепенно до 6.5 МПа, тогда как в случае низкой проницаемости пласта – до 12 МПа, при котором возможно образование трещин в горных породах [19].

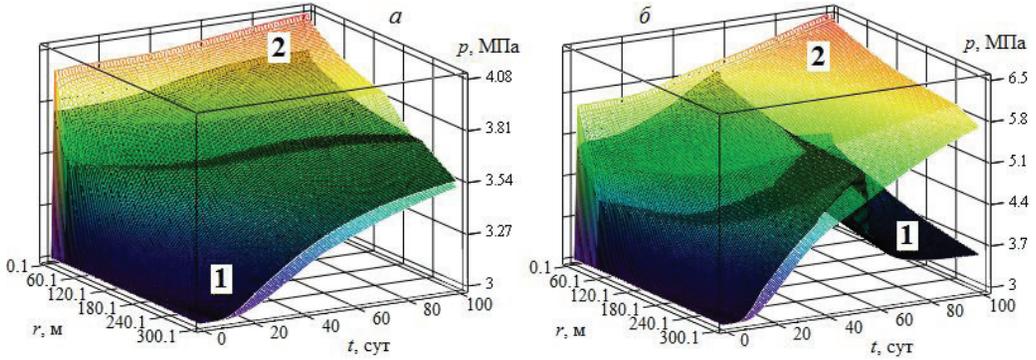


Рис. 2. Динамика полей давления при расходе газа: *a* – 1 м³/с; *б* – 5 м³/с (цифры на поверхностях соответствуют пористости: 1 – 0.15, 2 – 0.4)

Теперь рассмотрим влияние динамики полей давления и температуры на вытеснение воды и образование гидратов в хранилище. Ограничимся анализом случая пористости $m = 0.4$, поскольку результаты в случае низких значений пористости и проницаемости представлены в работах [16–19]. Также было получено, что скорость фронта водонасыщенности (рис. 3) существенно меньше скорости температурного фронта. На рис. 3 и рис. 4 видно, что распределение водонасыщенности качественно согласуется с решением задачи Бакли-Леверетта [21]. Влияние образования гидратов, то есть перехода части воды в неподвижную фазу, проявляется в немонотонности распределения водонасыщенности за фронтом и в том, что перед фронтом водонасыщенность всегда меньше 1 (см. кривые 2 на рис. 4). Естественно, скорость распространения фронта сильно зависит от темпа нагнетания газа. Однако, в соответствии с теорией двухфазного течения в пористой среде [21] нагнетание газа не может вытеснить всю пластовую воду (см. кривую 3 на рис. 3б).

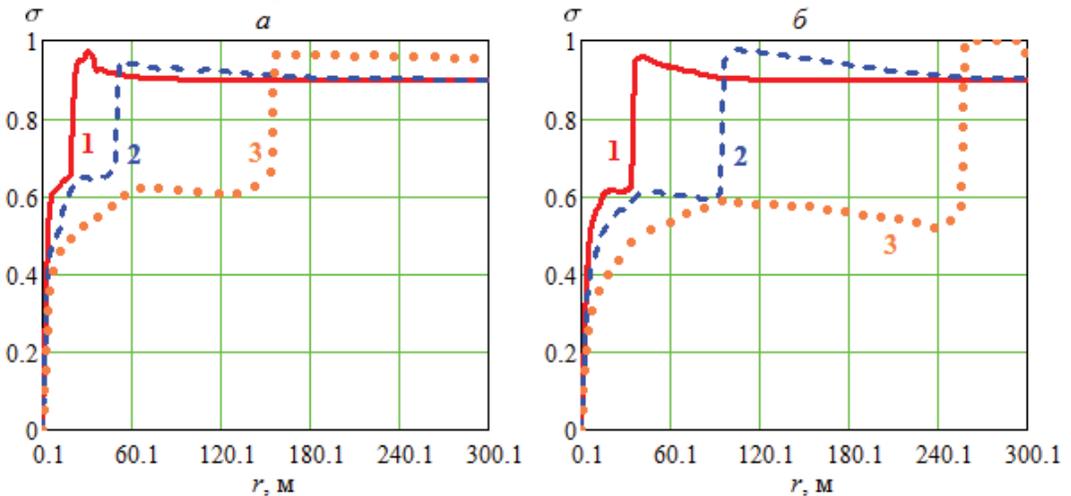


Рис. 3. Распределение водонасыщенности в пласте при расходе газа: *a* – 1 м³/с; *б* – 5 м³/с (1 – $t = 1.25$ сут, 2 – $t = 10$ сут, 3 – $t = 100$ сут)

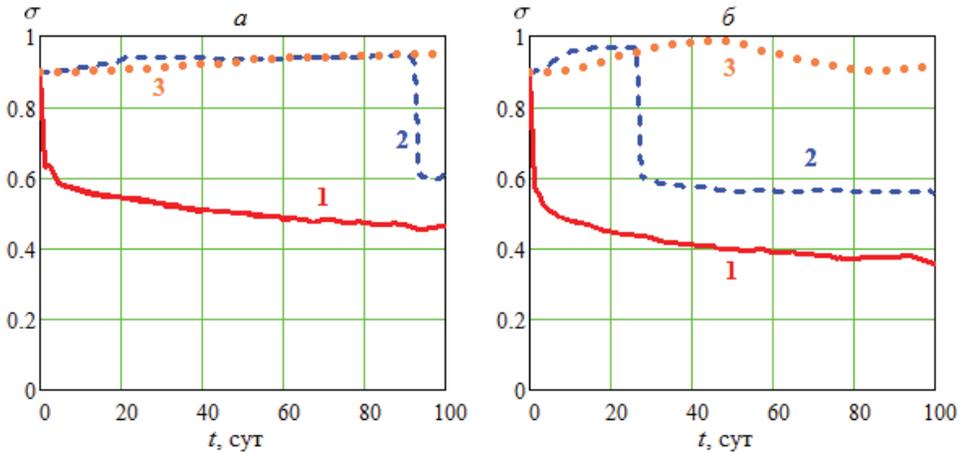


Рис. 4. Динамика водонасыщенности в пласте при расходе газа:
 $a - 1 \text{ м}^3/\text{с}$; $b - 5 \text{ м}^3/\text{с}$ ($1 - t = 12.4 \text{ м}$, $2 - r = 150.1 \text{ м}$, $3 - r = 300.1 \text{ м}$)

На рис. 5 видно, что высокая скорость закачки приводит к увеличению гидратонасыщенности в пласте. Это ясно из того факта, что высокое давление благоприятно для образования гидратов. Перспективным является рост насыщения гидратами на границе пласта со временем (кривая 3 на рис. 6б).

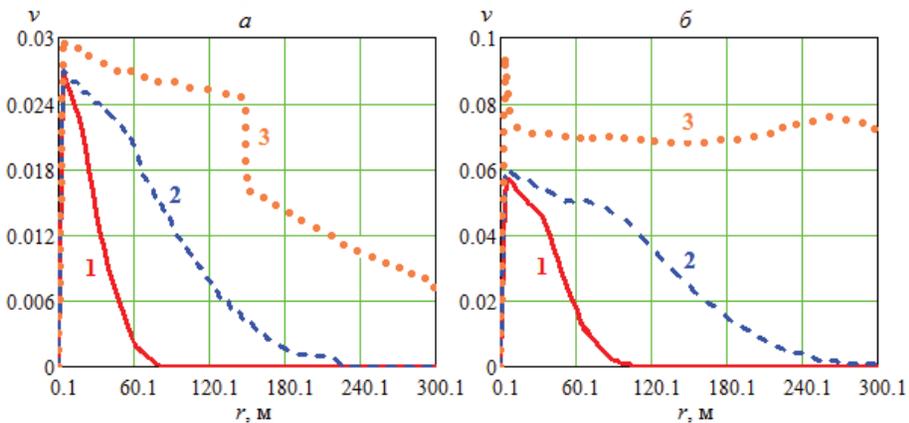


Рис. 5. Распределение гидратонасыщенности в пласте при расходе газа:
 $a - 1 \text{ м}^3/\text{с}$; $b - 5 \text{ м}^3/\text{с}$ ($1 - t = 1.25 \text{ сут}$, $2 - t = 10 \text{ сут}$, $3 - t = 100 \text{ сут}$)

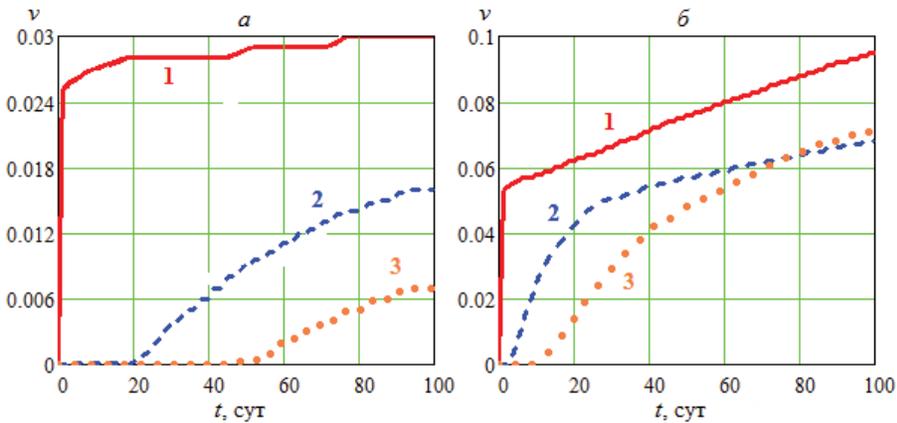


Рис. 6. Динамика гидратонасыщенности в пласте при расходе газа:
 $a - 1 \text{ м}^3/\text{с}$; $b - 5 \text{ м}^3/\text{с}$ ($1 - r = 12.4 \text{ м}$, $2 - r = 150.1 \text{ м}$, $3 - r = 300.1 \text{ м}$)

В случае низкой пористости и большого расхода температура и давление (см. поверхности I на рис. 1б и рис. 2б), а также гидратонасыщенность изменяются немонотонно: во всех точках пласта вначале резко увеличиваются, затем скорость их роста замедляется, далее примерно через 55 дней уменьшаются и выходят на стационарный режим.

Сравнение результатов рассмотренных вариантов показало, что гидратонасыщенность при высокой пористости пласта будет меньше, чем в случае низкой пористости. Это объясняется тем, что скорость вытеснения воды газом будет тем выше, чем меньше пористость. Следовательно, для создания подземного хранилища газа в гидратном состоянии следует выбирать водонасыщенные коллекторы с пористостью меньше 0.2.

Дополнительные исследования необходимы для оценки теплового взаимодействия таких хранилищ с окружающими горными породами (в том числе с многолетнемерзлыми) и образования гидратов после периода закачки. При этом предложенную математическую модель следует модифицировать в двумерной постановке. Также в дальнейших исследованиях в модели необходимо учесть зональную неоднородность, при которой пласт состоит из нескольких зон (областей пласта) с различными фильтрационно-емкостными свойствами.

Заключение

Представлена математическая модель многофазной неизотермической фильтрации реального газа и воды, в которой химическая реакция гидратообразования происходит при температуре, существенно зависящей от давления газа. Результаты расчетов показали, что возможность создания подземных хранилищ газа в гидратном состоянии существенно зависит от коллекторских свойств и данных гидродинамических исследований водоносных горизонтов. Получено, что чем меньше пористость и проницаемость пласта, тем быстрее увеличивается гидратонасыщенность и тем неравномернее она распределяется по водоносному пласту. Оценивая результаты вычислительного эксперимента в целом, можно утверждать, что при современных технологиях закачки создание подземных хранилищ газа в гидратном состоянии вполне реализуемо.

Полученные результаты и математические модели могут быть использованы при разработке научных основ технологий хранения природного газа, а также – попутных нефтяных, парниковых и токсичных газов в гидратном состоянии. Решение этой задачи существенно повысит надежность и экологичность систем газоснабжения арктических и северных регионов России.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Рег. № 122011100157-5, научная тема FWRS-2021-0003).

Литература

1. Макогон Ю.Ф. Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование. – М.: Недра, 1985. – 208 с.
2. Истомина В.А. Физико-химические исследования газовых гидратов: проблемы и перспективы. – М.: ТРЦ Газпром, 2000. – 71 с.
3. Swinkels W.J.A.M., R.J.J. Drenth Thermal reservoir simulation model of production from naturally occurring gas hydrate accumulations // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. – 2000. – vol. 3, iss. 6. – P. 559–566. doi: 10.2118/68213-PA.
4. Sun X., K.K. Mohanty Kinetic simulation of methane hydrate formation and dissociation in porous media // Chemical Engineering Science. – 2006. – vol. 61, no. 1. – P. 3476–3495. doi: 10.1016/j.ces.2005.12.017.
5. Uddin M., Coombe D.A., Law D.A., Gunter W.D. Numerical studies of gas-hydrates formation and decomposition in a geological reservoir // Journal of Energy Resources Technology. – 2008. – vol. 130, no. 3. – P. 032501-1. doi: 10.101115/1.2956978.
6. Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г. Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа. – М.: Наука, 2016. – 240 с.
7. Musakaev N.G. Solution of the problem of natural gas storages creating in gas hydrate state in porous reservoirs / N.G. Musakaev, M.K. Khasanov // Mathematics. – 2020. – vol. 8, iss. 1. doi: 10.3390/math8010036.

8. Мусакаев Н.Г. Численное исследование процесса образования газового гидрата в пористом коллекторе / Н.Г. Мусакаев, С.Л. Бородин, М.К. Хасанов // Прикладная механика и техническая физика. – 2021. – том 62, № 4(368). – С. 57–67. doi: 10.15372/PMTF20210406.
9. Khasanov M.K. Mathematical modeling of the process of gas injection into a reservoir with the formation of gas hydrate and melting ice / M.K. Khasanov, N.G. Musakaev // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2021. – vol. 42, no. 9. – P. 2151–2158. doi: 10.1134/S1995080221090158.
10. Khasanov M.K. Gas hydrate formation of sulfur dioxide by injection of liquid carbon dioxide into a natural layer saturated with methane and ice / M.K. Khasanov, S.R. Kildibaeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – iss. 302. – 7 p. doi: 10.1088/1755-1315/302/1/012053.
11. Khasanov M.K. Mathematical model of decomposition of methane hydrate during the injection of liquid carbon dioxide into a reservoir saturated with methane and its hydrate / M.K. Khasanov, M.V. Stolpovsky, S.R. Kildibaeva, N.G. Musakaev // Mathematics. – 2020. – vol. 8, no. 9. – 1482. doi: 10.3390/math8091482.
12. Khasanov M.K. Mathematical model of carbon dioxide injection into a porous reservoir saturated with methane and its gas hydrate / M.K. Khasanov, G.R. Rafikova, N.G. Musakaev // Energies. – 2020. – vol. 13. – 440. doi: 10.3390/en13020440.
13. Хасанов М.К. Математическая модель инъекции углекислого газа в газогидратный пласт / М.К. Хасанов, М.В. Столповский // Теоретические основы химической технологии. – 2021. – том 55, № 4. – С. 517–528. doi: 10.31857/S0040357121030088.
14. Shagapov V.Sh. Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas / V.Sh. Shagapov, N.G. Musakaev, M.K. Khasanov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – vol. 84. – P. 1030–1039. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.105.
15. Шагапов В.Ш. К теории образования газогидрата в частично водонасыщенной пористой среде при нагнетании метана / В.Ш. Шагапов, Г.Р. Рафикова, М.К. Хасанов // Теплофизика высоких температур. – 2016. – том 54, № 6. – С. 911–920. doi: 10.7868/S004036441606017X.
16. Рожин И.И. Термодинамические эффекты в математических моделях добычи природного газа в северных регионах: дис. д.т.н. – Рожин Игорь Иванович: Институт проблем нефти и газа СО РАН, 2015. – Якутск. – 264 с.
17. Бондарев Э.А. Математическое моделирование создания подземного хранилища природного газа в гидратном состоянии / Э.А. Бондарев, И.И. Рожин, В.В. Попов, К.К. Аргунова // Научные труды НИПИ «Нефтегаз» ГНКАР. – 2015. – № 2. – С. 54–67. doi: 10.5510/OGP20150200243.
18. Бондарев Э.А. Оценка возможности подземного хранения гидратов природного газа в зоне многолетней мерзлоты / Э.А. Бондарев, И.И. Рожин, В.В. Попов, К.К. Аргунова // Криосфера Земли. – 2015. – том XIX, № 4. – С. 64–74.
19. Bondarev E.A. Underground storage of natural gas in hydrate state: primary injection stage / E.A. Bondarev, I.I. Rozhin, V.V. Popov, K.K. Argunova // Journal of Engineering Thermophysics. – 2018. – vol. 27, No. 2. – P. 221–231. doi: 10.1134/S181023281802008X.
20. Bondarev, E.A. Simulation of multiphase flow in porous media accompanied by gas hydrate formation and dissociation / E.A. Bondarev, T.A. Kapitonova // Russian Journal of Engineering Thermophysics. – 1999. – vol. 9, no. 1-2. – P. 83–97.
21. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. – М.: Гостехиздат, 1963. – 396 с.
22. Бондарев, Э.А. Плоскопараллельная неизотермическая фильтрация газа: роль теплопереноса / Э.А. Бондарев, К.К. Аргунова, И.И. Рожин // Инженерно-физический журнал. – 2009. – том 82, № 6. – С. 1059–1065.
23. Bondarev E.A. Plane-parallel nonisothermal gas filtration: the role of thermodynamics / E.A. Bondarev, K.K. Argunova, I.I. Rozhin // Journal of Engineering Thermophysics. – 2009. – Vol. 18, No. 2. – P. 168–176. doi: 10.1134/S1810232809020088.
24. Басниев К.С., Власов А.М., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидравлика. – М.: Недра, 1986. – 304 с.
25. Бондарев Э.А., Бабе Г.Д., Гройсман А.Г., Каниболотский М.А. Механика образования гидратов в газовых потоках. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. – 157 с.
26. Истомин В.А., Квон В.Г. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. – 506 с.
27. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases. – Boca Raton: Taylor&Francis Group/CRC Press, 2008. – 720 p.

28. Латонов В.В. Расчет коэффициента сжимаемости природных газов / В.В. Латонов, Г.Р. Гуревич // Газовая промышленность. – 1969. – № 2. – С. 7–9.
29. Kay W.B. Density of hydrocarbon gases and vapors at high temperature and pressures // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1936. – Vol. 28. – P. 1014–1019.
30. Бондарев Э.А. Динамика образования гидратов при добыче природного газа / Э.А. Бондарев, В.В. Попов // *Вычислительные технологии*. – 2002. – № 1. – С. 28–33.
31. Васильев В.И., Попов В.В., Васильев В.И., Тимофеева Т.С. Вычислительные методы в разработке месторождений нефти и газа. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 126 с.

References

1. Makogon YU.F. Gazovye gidraty, preduprezhdenie ih obrazovaniya i ispol'zovanie. – M.: Nedra, 1985. – 208 s.
2. Istomin V.A. Fiziko-himicheskie issledovaniya gazovyh gidratov: problemy i perspektivy. – M.: TRC Gazprom, 2000. – 71 s.
3. Swinkels W.J.A.M., R.J.J. Drenth Thermal reservoir simulation model of production from naturally occurring gas hydrate accumulations // *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. – 2000. – vol. 3, iss. 6. – P. 559–566. doi: 10.2118/68213-PA.
4. Sun X., K.K. Mohanty Kinetic simulation of methane hydrate formation and dissociation in porous media // *Chemical Engineering Science*. – 2006. – vol. 61, no. 1. – P. 3476–3495. doi: 10.1016/j.ces.2005.12.017.
5. Uddin M., Coombe D.A., Law D.A., Gunter W.D. Numerical studies of gas-hydrates formation and decomposition in a geological reservoir // *Journal of Energy Resources Technology*. – 2008. – vol. 130, no. 3. – P. 032501-1. doi: 10.101115/1.2956978.
6. Shagapov V.SH., Musakaev N.G. Dinamika obrazovaniya i razlozheniya gidratov v sistemah dobychi, transportirovki i hraneniya gaza. – M.: Nauka, 2016. – 240 s.
7. Musakaev N.G. Solution of the problem of natural gas storages creating in gas hydrate state in porous reservoirs / N.G. Musakaev, M.K. Khasanov // *Mathematics*. – 2020. – vol. 8, iss. 1. doi: 10.3390/math8010036.
8. Musakaev N.G. CHislennoe issledovanie processa obrazovaniya gazovogo gidrata v poristom kollektore / N.G. Musakaev, S.L. Borodin, M.K. Hasanov // *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. – 2021. – tom 62, № 4(368). – S. 57–67. doi: 10.15372/PMTF20210406.
9. Khasanov M.K. Mathematical modeling of the process of gas injection into a reservoir with the formation of gas hydrate and melting ice / M.K. Khasanov, N.G. Musakaev // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2021. – vol. 42, no. 9. – P. 2151–2158. doi: 10.1134/S1995080221090158.
10. Khasanov M.K. Gas hydrate formation of sulfur dioxide by injection of liquid carbon dioxide into a natural layer saturated with methane and ice / M.K. Khasanov, S.R. Kildibaeva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – iss. 302. – 7 p. doi: 10.1088/1755-1315/302/1/012053.
11. Khasanov M.K. Mathematical model of decomposition of methane hydrate during the injection of liquid carbon dioxide into a reservoir saturated with methane and its hydrate / M.K. Khasanov, M.V. Stolpovsky, S.R. Kildibaeva, N.G. Musakaev // *Mathematics*. – 2020. – vol. 8, no. 9. – 1482. doi: 10.3390/math8091482.
12. Khasanov M.K. Mathematical model of carbon dioxide injection into a porous reservoir saturated with methane and its gas hydrate / M.K. Khasanov, G.R. Rafikova, N.G. Musakaev // *Energies*. – 2020. – vol. 13. – 440. doi: 10.3390/en13020440.
13. Hasanov M.K. Matematicheskaya model' inzhekcii uglekislogo gaza v gazogidratnyj plast / M.K. Hasanov, M.V. Stolpovskij // *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*. – 2021. – tom 55, № 4. – S. 517–528. doi: 10.31857/S0040357121030088.
14. Shagapov V.Sh. Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas / V.Sh. Shagapov, N.G. Musakaev, M.K. Khasanov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – vol. 84. – P. 1030–1039. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.105.
15. Shagapov V.SH. K teorii obrazovaniya gazogidrata v chastichno vodonasyshchennoj poristoj srede pri nagnetanii metana / V.SH. SHagapov, G.R. Rafikova, M.K. Hasanov // *Teplotfizika vysokih temperatur*. – 2016. – tom 54, № 6. – S. 911–920. doi: 10.7868/S004036441606017X.
16. Rozhin I.I. Termodinamicheskie efekty v matematicheskikh modelyakh dobychi prirodnogo gaza v severnyh regionah: dis. d.t.n. – Rozhin Igor' Ivanovich: Institut problem nefti i gaza SO RAN, 2015. – YAkutsk. – 264 s.

17. Bondarev E.A. Matematicheskoe modelirovanie sozdaniya podzemnogo hranilishcha prirodnogo gaza v gidratnom sostoyanii / E.A. Bondarev, I.I. Rozhin, V.V. Popov, K.K. Argunova // Nauchnye trudy NIPI «Neftegaz» GNKAR. – 2015. – № 2. – S. 54–67. doi: 10.5510/OGP20150200243.
18. Bondarev E.A. Ocenka vozmozhnosti podzemnogo hraneniya gidratov prirodnogo gaza v zone mnogoletnej merzloty / E.A. Bondarev, I.I. Rozhin, V.V. Popov, K.K. Argunova // Kriosfera Zemli. – 2015. – tom XIX, № 4. – S. 64–74.
19. Bondarev E.A. Underground storage of natural gas in hydrate state: primary injection stage / E.A. Bondarev, I.I. Rozhin, V.V. Popov, K.K. Argunova // Journal of Engineering Thermophysics. – 2018. – vol. 27, no. 2. – P. 221–231. doi: 10.1134/S181023281802008X.
20. Bondarev, E.A. Simulation of multiphase flow in porous media accompanied by gas hydrate formation and dissociation / E.A. Bondarev, T.A. Kapitonova // Russian Journal of Engineering Thermophysics. – 1999. – vol. 9, no. 1-2. – P. 83–97.
21. Charnyj I.A. Podzemnaya gidrogazodinamika. – M.: Gostoptekhizdat, 1963. – 396 s.
22. Bondarev, E.A. Ploskoparallel'naya neizotermicheskaya fil'traciya gaza: rol' teploperenosa / E.A. Bondarev, K.K. Argunova, I.I. Rozhin // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2009. – tom 82, № 6. – S. 1059–1065.
23. Bondarev E.A. Plane-parallel nonisothermal gas filtration: the role of thermodynamics / E.A. Bondarev, K.K. Argunova, I.I. Rozhin // Journal of Engineering Thermophysics. – 2009. – Vol. 18, No. 2. – P. 168–176. doi: 10.1134/S1810232809020088.
24. Basniev K.S., Vlasov A.M., Kochina I.N., Maksimov V.M. Podzemnaya gidravlika. – M.: Nedra, 1986. – 304 s.
25. Bondarev E.A., Babe G.D., Grojsman A.G., Kanibolotskij M.A. Mekhanika obrazovaniya gidratov v gazovyh potokah. – Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie, 1976. – 157 s.
26. Istomin V.A., Kvon V.G. Preduprezhdenie i likvidaciya gazovyh gidratov v sistemah dobychi gaza. – M.: OOO «IRC Gazprom», 2004. – 506 s.
27. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases. – Boca Raton: Taylor&Francis Group/CRC Press, 2008. – 720 p.
28. Latonov V.V. Raschet koeficienta szhimaemosti prirodnih gazov / V.V. Latonov, G.R. Gurevich // Gazovaya promyshlennost'. – 1969. – № 2. – S. 7–9.
29. Kay W.B. Density of hydrocarbon gases and vapors at high temperature and pressures // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1936. – Vol. 28. – P. 1014–1019.
30. Bondarev E.A. Dinamika obrazovaniya gidratov pri dobyche prirodnogo gaza / E.A. Bondarev, V.V. Popov // Vychislitel'nye tekhnologii. – 2002. – № 1. – S. 28–33.
31. Vasil'ev V.I., Popov V.V., Vasil'ev V.I., Timofeeva T.S. Vychislitel'nye metody v razrabotke mestorozhdenij nefi i gaza. – Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000. – 126 s.

П.К. Янец, С.А. Иванова, Ю.Г. Данилов
СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ GOOGLE EARTH ENGINE (GEE) И СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ LANDSAT ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Аннотация. Проблема лесных пожаров становится все более заметной как в глобальном, так и в местном масштабе. Пожары в Якутии являются серьезной проблемой. Бореальные леса играют важную роль в глобальном потеплении и циркуляции углекислого газа. Изменения пожарного режима и климата в этом регионе уже начались, и это оказывает влияние на углеродную динамику в региональном и глобальном масштабе. Все чаще при изучении пожаров используются спутниковые данные. В последние годы при обработке спутниковых данных используются так называемые «большие данные». Чтобы правильно оценить масштаб угрозы, необходимо разработать эффективную методику оценки послепожарных характеристик. Для исследований были выбраны данные с сенсора MODIS Collection 6 из-за их большей доступности и достаточного пространственного разрешения для нашей работы. Использованы данные за период с 2001 по 2019 год из пожарного архива FIRMS. В данной статье представлен метод определения некоторых характеристик пожаров с использованием «больших данных» и платформы Google Earth Engine. Алгоритмы, созданные для определения основных послепожарных характеристик, были применены на примере Верхоянского района Якутии. Результаты приведены на примере пожаров в период 2001-2019 годов. Для анализа использовались данные программы FIRMS из инструмента Modis и VIIRIS, а также данные Landsat.

Ключевые слова: лесной пожар, Якутия, Верхоянский район, Landsat, FIRMS, Google Earth Engine, большие данные, NBR.

P.K. Janiec, S.A. Ivanova, Y.G. Danilov
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

USING GOOGLE EARTH ENGINE (GEE) AND LANDSAT SATELLITE IMAGES TO DETECT FOREST FIRES

Abstract. The problem of forest fires is becoming more and more visible both globally and locally. Fires in Yakutia are a serious problem. Boreal forests play an important role in global warming and carbon dioxide circulation. Changes in the fire regime and climate in this region have already begun, and this has an impact on

ЯНЕЦ Петр Кжуштоф – аспирант Эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: piotrjaniec2@gmail.com

JANIEC Petr Kzhushstof – post-graduate student, Ecological and Geographical Division, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: piotrjaniec2@gmail.com

ИВАНОВА Светлана Алексеевна – к.п.н., доцент Эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: sa.ivanova@s-vfu.ru

IVANOVA Svetlana Alekseevna – Candidate of Pedagogical Science, Associate Professor, Ecological and Geographical Division, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: sa.ivanova@s-vfu.ru

ДАНИЛОВ Юрий Георгиевич – к.г.н., доцент Эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: iug.danilov@s-vfu.ru

DANILOV Yuri Gerogievich – Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor, Ecological and Geographical Division, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: iug.danilov@s-vfu.ru

carbon dynamics on a regional and global scale. Increasingly, satellite data is being used to study fires. In recent years, so-called “Big Data” has been used in the processing of satellite data. In order to correctly assess the magnitude of the threat, it is necessary to develop an effective methodology for assessing post-fire performance. Data from the MODIS Collection 6 sensor were chosen for research because of their greater availability and sufficient spatial resolution for our work. We used data for the period from 2001 to 2019 from the FIRMS fire archive. This article presents a method for determining some of the characteristics of fires using Big Data and the Google Earth Engine platform. Algorithms created to determine the main post-fire characteristics were applied on the example of the Verkhoyansk region of Yakutia. The results are given on the example of fires in Verkhoyansk district of Yakutia in the period 2001 – 2019. For the analysis, data from the FIRMS program from the Modis and VIIRS instruments, as well as Landsat data were used.

Keywords: forest fire, Yakutia, Verkhoyansk district, Landsat, FIRMS, Google Earth Engine, big data, NBR.

Введение

В последние десятилетия тема лесных пожаров становится все более актуальной. Лесные пожары являются одной из основных причин экологического ущерба. Особенно катастрофические пожары, площадь которых превышает 500 га, вызывают сильные нарушения в дикой природе, вызывая длительные и вредные изменения, а также способствуют формированию парникового эффекта. В среднем за год в мире образуется несколько сотен тысяч лесных пожаров. На территории Российской Федерации с начала пожароопасного периода 2019 г. возникло более 14,4 тыс. очагов природных пожаров на общей площади свыше 10 078 млн. га [1].

Одна из самых сложных ситуаций наблюдается в Республике Саха (Якутия). Бореальные леса играют важную роль в глобальном потеплении и циркуляции углекислого газа. Изменения пожарного режима и климата в этом регионе уже начались, и это оказывает влияние на углеродную динамику в региональном и глобальном масштабе. Наиболее значительные изменения связаны с бореальными лесными массивами [2]. На такой обширной и труднодоступной территории, как бореальные леса, полевые исследования невозможны и нерентабельны. Не вызывает сомнения факт, что Якутия очень важна в глобальной экосистеме. Тем не менее региону уделяется слишком мало внимания. Большая территория, неразвитая сеть дорожной инфраструктуры и низкая плотность населения затрудняют исследования в этой части мира. Чтобы правильно оценить масштаб угрозы, необходимо разработать эффективную методику оценки послепожарных характеристик. Этот метод должен быть простым, точным, дешевым и быстрым. Для реализации этих целей необходимо использовать данные дистанционного зондирования и так называемые «big data».

Для исследований были выбраны данные с сенсора MODIS Collection 6 из-за их большей доступности и достаточного пространственного разрешения для нашей работы. Использованы данные за период с 2001 по 2019 год из пожарного архива FIRMS. Версия Earth Engine набора данных Fire Information for Resource Management System (FIRMS) содержит продукт обнаружения пожара LANCE в растеризованном виде. Для работы с таким количеством данных была выбрана платформа геопространственной обработки данных «Google Earth Engine» (GEE) на базе Google Cloud Platform. Алгоритмы, созданные для определения основных послепожарных характеристик, были применены на примере Верхоянского района Якутии.

Материалы и методы исследования

В качестве исследовательского региона был выбран Верхоянский район Республики Саха Якутия. Этот регион был выбран вследствие большого количества пожаров в последние годы и большой изменчивости климатических и разнообразию орографических условий.

В Республике Саха (Якутия) открытых данных о лесных пожарах с геопривязкой нет. Есть база данных о лесных пожарах Минприроды (<https://minpriroda.sakha.gov.ru>), но эти данные являются табличными, и без географической привязки невозможно создать базу данных ГИС, необходимую для данного вида исследований. В дополнение к этим данным использовано два источника данных дистанционного зондирования. Данные систем Modis (FIRMS) и Landsat.

Данные систем Modis собираются с 2001 г. по настоящее время. Для исследований были выбраны данные с сенсора MODIS Collection 6 из-за их большей доступности и достаточного пространственного разрешения для нашей работы. Используются данные за период с 2001 по 2019 год из пожарного архива FIRMS. Версия Earth Engine набора данных Fire Information for Resource Management System (FIRMS) содержит продукт обнаружения пожара LANCE в растрованном виде. Активные очаги возгорания в режиме реального времени (NRT) обрабатываются LANCE с использованием стандартного продукта MODIS MOD14/MYD14 Fire and Thermal Anomalies. Каждое активное место пожара представляет собой центроид пикселя длиной 1 км, который помечается алгоритмом как содержащий один или несколько очагов возгорания внутри пикселя. Данные растрованы следующим образом: для каждой активной точки пожара определяется ограничивающая рамка (BB) длиной 1 км; идентифицируются пиксели в синусоидальной проекции MODIS, которые пересекают BB; если несколько BB пересекают один и тот же пиксель, сохраняется пиксель с большей достоверностью [3].

Второй источник данных – это продукты миссии Landsat. Используются данные спутников Landsat 5, 7 и 8. Собраны все доступные изображения за период 2001-2019 гг. Места возможных пожаров были выбраны с использованием данных FIRMS. Вокруг каждого пожара, зарегистрированного спутником Modis, создан буфер радиусом 3 км. Затем на каждом участке, охваченном буфером, было выбрано 2 изображения: за год до пожара и через год после пожара. Критерии выбора: съемка в течение вегетационного периода, как можно меньшая облачность.

Следующим шагом было создание маски, закрывающей облака, воду и снег на каждом изображении Landsat. Целью этого было исключение из дальнейшего анализа мест, где отсутствуют возможности возгорания. Для достижения этой цели использовался канал pixel_qa, содержащийся в данных Landsat Surface Reflectance. Пример функции создания маски для данных Landsat 8, показан на рис. 1.

```
function maskL8sr(image) {
  // Bits 3 and 5 are cloud shadow and cloud, respectively.
  var cloudShadowBitMask = 1 << 3;
  var cloudsBitMask = 1 << 5;
  var waterBitMask = 1 << 2;
  var snowBitMask = 1 << 4;
  // Get the pixel QA band.
  var qa = image.select('pixel_qa');

  // Both flags should be set to zero, indicating clear
  conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0))
    .and(qa.bitwiseAnd(waterBitMask).eq(0))
    .and(qa.bitwiseAnd(snowBitMask).eq(0));

  // Return the masked image, scaled to reflectance, without
  the QA bands.
  return image.updateMask(mask).divide(10000)
    .select("B[0-9]*")
    .copyProperties(image, ["system:time_start"]);
}
```

Рис. 1. Пример функции создания маски для данных Landsat 8

На следующем этапе была оценена тяжесть пожара. Тяжесть пожара оценивается дистанционно с использованием спектральных индексов, как по одностатейным, так и по многовременным индексным данным [4–7]. Один из показателей, представленных в качестве надежного средства картирования интенсивности пожара, называется нормализованным коэффициентом горения (NBR), вычисляемым как разность между отражением в ближнем инфракрасном (NIR) и среднем инфракрасном (MIR) диапазонах, деленная на их сумму [8]. В Landsat 4-7 (1):

$$NBR = \frac{(\text{канал 4} - \text{канал 7})}{(\text{канал 4} + \text{канал 7})} \quad (1)$$

В Landsat 8 (2):

$$NBR = \frac{(\text{канал 5} - \text{канал 7})}{(\text{канал 5} + \text{канал 7})} \quad (2)$$

Для каждого из изображений, до и после, пожара был рассчитан NBR в каждом из пикселей снимка.

Затем был рассчитан показатель ΔNBR . ΔNBR рассчитывается по формуле (3):

$$\Delta NBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire} \dots \quad (3)$$

В лесах Северной Америки ΔNBR широко применялся как совпадающий (один год после пожара) показатель воздействия на растительный покров [8]. Разница между NBR до и после пожара в настоящее время является основным методом картирования крупных удаленных пожаров на общественных территориях.

Объемы значений ΔNBR могут варьировать в зависимости от сцены, и для достижения наилучших результатов интерпретация в конкретных случаях всегда должна основываться на некоторой полевой оценке. Однако классификация из программы USGS FireMon [9] может быть полезна в качестве первого приближения для интерпретации разницы в NBR. Поэтому значения ΔNBR были реклассифицированы в соответствии с табл. 1.

Таблица 1 – Классы ΔNBR по степени тяжести пожара

УРОВЕНЬ ТЯЖЕСТИ ПОЖАРА	ДИАПАЗОН ΔNBR
Высокий послепожарный рост	< -0.25
Низкий послепожарный рост	От -0.25 до -0.1
Несгоревшее	От -0.1 до +0.1
Пожар низкой степени тяжести	От 0.1 до 0.27
Пожар средней степени тяжести	От 0.27 до 0.44
Пожар средней и высокой степени тяжести	От 0.44 до 0.66
Пожар высокой степени тяжести	> 0.66

Перед установкой пределов возгорания необходимо было сгладить переклассифицированные растры. Необходимо было удалить отдельные пиксели, пространственно попадающие в другие классы, и сгладить границы классов. Для этого производилась линейная свертка. Использовалась функция `image.convolve`. Использовалось низкочастотное (сглаживающее) ядро для удаления высокочастотной информации. Сглаживание позволило ускорить векторизацию и решить проблему недостаточной вычислительной мощности.

Следующим этапом было определение границ пожаров. Границы лесных пожаров определялись на основе ΔNBR . На основании наблюдений было установлено, что все значения ΔNBR , превышающие 0,27, находились на территории пожаров. Значения ΔNBR между 0,00 – 0,27 часто давали ошибочные результаты, поэтому они не были классифицированы как пожарные

территории. Данные с ΔNBR выше 0,27 были объединены в маску и затем векторизованы, что позволило определить пределы пожаров.

Заключительным этапом было определение площади каждого пожара в период с 2001 по 2019 год. Вся методика исследования представлена на рисунке 2.

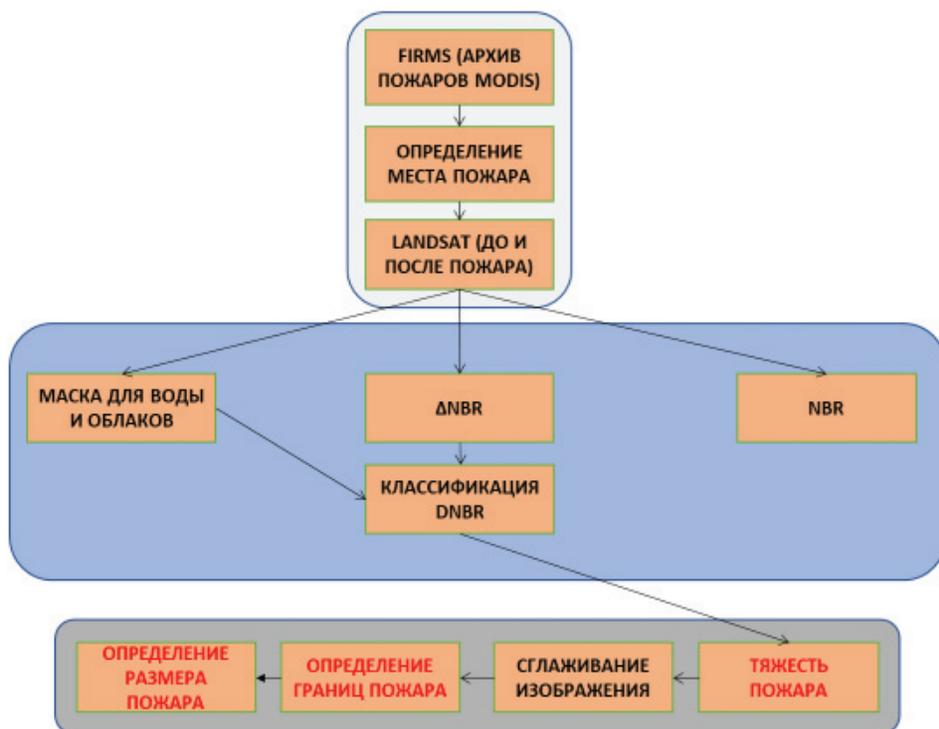


Рис. 2. Методика определения характеристик пожаров с помощью GEE

Результаты исследования

Верхоянский район один из тридцати четырех муниципальных районов в Республике Саха (Якутия). Он расположен на севере региона. Район относится к горной зоне, где территорию занимает Верхоянская горная система. На севере района широко распространены лишайниковые и моховые тундры. Средняя температура января колеблется от -48°C до -38° , а средняя температура июля колеблется от $+16^{\circ}\text{C}$ до $+17^{\circ}$. Годовое количество осадков колеблется от 150 до 300 миллиметров. Главной рекой региона является река Яна. Бассейн реки Яны охватывает как высокогорья с преимущественным развитием горных тундр и каменистых пустынь, так и плоскогорья с горными лиственничными лесами. В горном ландшафте преобладают кедровый стланик и кустарниковая береза, а поверхность почвы покрывают лишайники [10].

Результаты в картографической форме представлены на примере пожара 2014 г. в центральной части Верхоянского района. Для анализа использовались снимки Landsat 8. Все результаты, представленные в схематической форме, приведены на рис. 3.

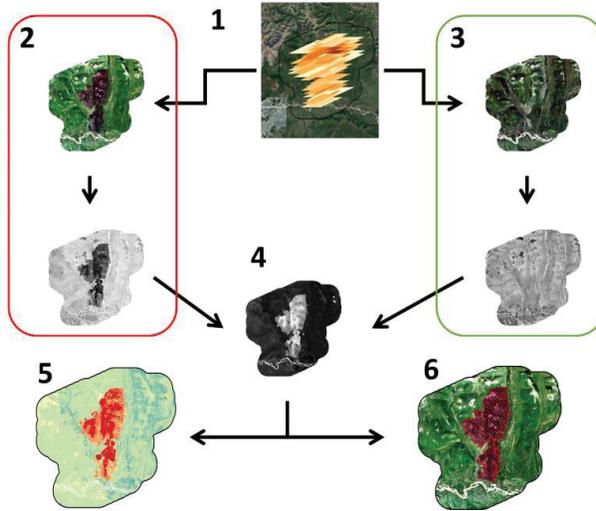


Рис. 3. Результаты анализа пожаров в Верхоянском районе на примере пожара 2014 г. (1. Пожар по данным FIRMS; 2. Снимок Landsat за год до пожара (2013), композиция RGB и индикатор NBR; 3. Снимок Landsat через год после пожара (2015), композиция RGB и индикатор NBR; 4. Индикатор ΔNBR ; 5. Классификация ΔNBR на 6 классов тяжести; 6. Площадь пожара по данным Landsat)

На рис. 4 представлена карта пожара с указанием классов тяжести пожара и площади пожара. По нашим подсчетам, площадь пожара составила 7914,69 га. Самая большая площадь была классифицирована как пожар высокой степени тяжести (3595,39 га). 3067,69 га классифицированы в класс средней и высокой степени тяжести. Наименьшая площадь была классифицирована как пожар средней степени тяжести (1251,61 га). Класс низкой тяжести был отклонен из анализа, так как слишком много пикселей в этом классе было неправильно классифицировано.

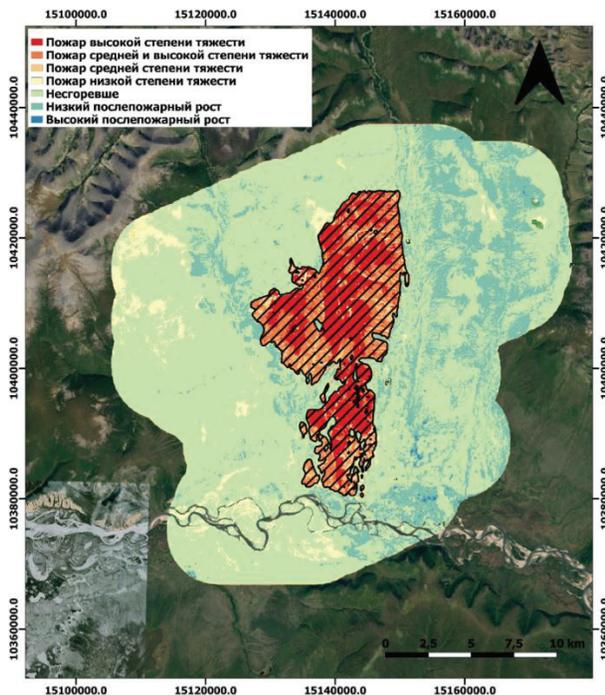


Рис. 4. Карта пожара 2014 г. в центральной части Верхоянского района с указанием классов тяжести пожара и площади пожара. Черной линией обозначена площадь пожара

Можно отметить, что площадь пожара, по данным FIRMS и Landsat, значительно отличается (рис. 5). По данным FIRMS, площадь пожара составила 24185,49 га. Площадь, созданная с помощью NBR и изображений Landsat, составляет 7914,6 га. Площадь, полученная из данных Landsat, более чем в 3 раза меньше, чем площадь, полученная из данных FIRMS.

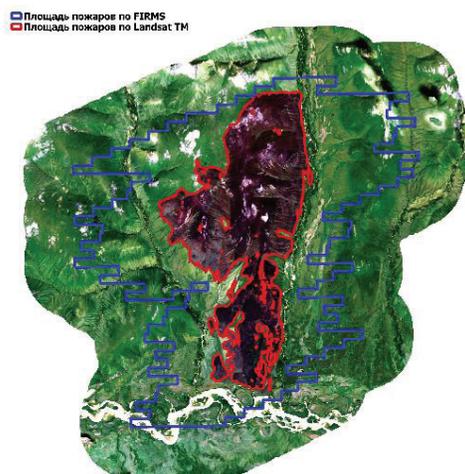


Рис. 5. Сравнение площади пожаров по FIRMS и Landsat

Также был проведен анализ площади пожаров в период с 2001 по 2019 год. В табл. 2 представлено сравнение общей годовой площади пожаров в эти годы, на территории исследования. В анализе сравнивалась площадь, рассчитанная по данным FIRMS и Landsat.

Таблица 2 – Сопоставление площади пожаров на территории Верхоянского района по данным FIRMS и Landsat

Год	Площадь пожаров, [га]		Разница, [%]
	FIRMS	Landsat	
2001	973549,53	-	-
2002	121354,81	-	-
2003	148681,16	-	-
2004	0,00	-	-
2005	106163,96	-	-
2006	20891,96	-	-
2007	41096,19	-	-
2008	51620,51	14319,25	72,26
2009	125328,37	-	-
2010	18645,50	-	-
2011	19367,85	1444,86	92,54
2012	90415,11	11714,57	87,04
2013	53897,96	-	-
2014	80212,85	19425,49	75,78
2015	4520,49	5,25	99,88
2016	9085,77	217,30	97,61
2017	10030,41	275,16	97,26
2018	382216,78	196157,10	48,68
2019	1791980,55	737059,71	58,87

Можно заметить, что для данных Landsat не во все годы было доступно достаточное количество изображений, из-за чего невозможно вычислить площадь пожаров. Это связано с географическим положением, в котором пролеты спутников Landsat 4-5 не так часты, сбоем корректора линии сканирования на спутнике Landsat 7 и частой сильной облачностью. Только после 2013 года, когда начал работать спутник Landsat 8, стало возможным ежегодно собирать необходимое количество снимков для расчета площади пожаров для всего региона. Можно заметить, что, как и на примере, показанном на рисунке № 5, общая площадь пожаров, рассчитанная с помощью Landsat, ежегодно в несколько раз меньше, чем рассчитанная с помощью данных FIRMS. Процентная разница колеблется между 48,68 % и 99,88 %. Можно заметить, что разница увеличивается с уменьшением общей годовой площади пожаров.

Обсуждение результатов

В этой работе представлен метод автоматического определения площади и тяжести пожара, с помощью GEE. GEE уже использовался для такой работы как в глобальном [11], так и в местном масштабе [12-13]. В этой работе показано использование GEE на северо-востоке Сибири на примере Верхоянского района Якутии.

Первым этапом работ было определение потенциальных мест возгорания. Для этого использовались данные FIRMS. Эти данные имеют пространственное разрешение 1 км, что сильно влияет на их точность. Такой большой пиксель мог привести к тому, что небольшие пожары не могли быть идентифицированы. Именно это могло привести к тому, что в 2004 году не было зарегистрировано ни одного пожара. Это подтверждается исследованиями Уэйгла, который изучал пожары на Аляске [14]. Использование данных FIRMS позволило существенно сузить территорию исследования, что уменьшило объем данных и ускорило последующие вычисления.

Для определения характеристик пожаров использовались изображения Landsat. Такой подход позволил уменьшить масштаб анализов с 1 км до 30 м. Из-за отсутствия данных за 2001–2007 и 2010, 2011 и 2013 годы было невозможно провести дальнейший анализ в эти годы. Для другой территории в эти годы возможно использование данных Landsat 4 и 5, однако необходимо заранее проверить карты покрытия данными для этих спутников. С 2014 года методика может успешно применяться на территории Якутии, так как спутник Landsat 8 обеспечивает полное покрытие территории республики.

Для определения тяжести пожара использовался индикатор ΔNBR . Этот индекс успешно использовался во многих исследованиях [15-16]. Индекс хорошо себя зарекомендовал на территории Верхоянского района, но в будущем диапазоны значений в отдельных классах могут быть немного изменены и адаптированы к региону на основе выборочных площадок. Индекс также чувствителен к топографии, поэтому в будущем необходимо включить этот фактор в исследование [17].

На последнем этапе рассчитывалась площадь возгорания на исследуемой территории. Он рассчитан на основе данных FIRMS и Landsat. Можно сделать вывод, что данные FIRMS и Landsat существенно различаются по результатам. В дальнейшем эти данные следует сравнить с официальными данными пожарной службы, чтобы определить, какие из них более точны. Однако визуальный осмотр показывает, что результаты, полученные по данным Landsat, более точны. Это также подтверждается исследованиями Мортон, который сравнивал данные Landsat и Modis [18].

Заключение

Якутия – одна из самых больших, наименее населенных и урбанизированных территорий в мире. Ежегодно, здесь горит несколько миллионов гектаров леса. При исследовании лесных пожаров очень важно определить их характеристики. В масштабе Якутии определить эти характеристики в полевых условиях невозможно. Это приведет к слишком большому экономическим и временным потерям.

Можно сделать вывод, что метод, представленный в исследованиях, несмотря на необходимость доработки, демонстрирует значительный потенциал и большое преимущество перед традиционными методами. GEE значительно упрощает работу с «большими данными». Это исследование подчеркивает силу применения обработки изображений GEE для непрерывного анализа изображений Landsat. В ближайшем будущем включение новых спутников, таких как Sentinel, позволит ученым лучше понять пожары и определять их характеристики. В дополнение к включению большего количества изображений, доступных в интерфейсе GEE, растущее сообщество специалистов-практиков GEE также приведет к дальнейшему развитию инструментов и методов, предназначенных для ускорения обработки изображений и анализа спутниковых изображений.

В будущем метод, представленный в исследовании, может быть использован на практике в лесном хозяйстве, пожарной службе и других службах, а также использоваться для определения потерь после пожаров и при планировании дальнейших действий.

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2019 году». – М.: МЧС России; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2020. – 259 с.
2. Kasischke E.S. Fire, Climate change, and carbon cycling in the boreal forest. Vol. 138. – Springer Science & Business Media, 2012. – 464 p.
3. Giglio L. Modis collection 6 active fire product user's guide revision A. – Unpublished Manuscript, Department of geographical Sciences University of Maryland, 2015. – 64 p.
4. Jakubauskas M.E., Lulla K.P., Mausel P.W. Assessment of vegetation change in a fire-altered forest landscape // PE&RS, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 1990. – vol. 56(3). – P. 371-377.
5. White J.E., Ryan K., Key C., Running S. Remote sensing of fire severity and vegetation recovery // International Journal of Wildland Fire – 1996. – vol. 6. – P. 125–136.
6. Michalek J.L., Colwell J.E., French N.H.F., Kasischke E.S., Johnson R.D. Using Landsat data to estimate carbon release from burned biomass in an Alaskan spruce forest complex // International. Journal of. Remote Sensing – 2000. – vol. 21. – P. 329–343.
7. Cocke E., Fule P.Z., Crouse J.E. Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data // International Journal of Wildland Fire. – 2005. – vol. 14. – P. 189–198.
8. Smith A.M.S., Lentile L.B., Huda A.T., Morgan P. Evaluation of linear spectral unmixing and Δ NBR for predicting post-fire recovery in a North American ponderosa pine forest // International Journal of Remote Sensing. – 2007. – Vol. 28. – P. 5159-5166.
9. Lutes D.C. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system / Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 1 CD., 2006.
10. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР / ред. кол.: И.А. Матвеев, М.Е. Николаев, Т.Д. Сивцев и др. – М.: ГУГК при СМ СССР, 1989. – 115 с.
11. Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Yin R. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine // Remote Sensing. – 2019. – vol. 11(5). – P. 489.
12. Daldegan G.A., Roberts D.A., Ribeiro F. de Figueiredo. Spectral mixture analysis in Google Earth Engine to model and delineate fire scars over a large extent and a long time-series in a rainforest-savanna transition zone // Remote Sensing of Environment. – 2019. – vol. 232. – P. 111340.
13. Quintero N., Viedma O., Urbieto I. R., Moreno J.M. Assessing Landscape Fire Hazard by Multitemporal Automatic Classification of Landsat Time Series Using the Google Earth Engine in West-Central Spain // Forests. – 2019. – vol. 10(6). – P. 518.
14. Waigl C.F., Stuefer M., Prakash A., Ichoku C. Detecting high and low-intensity fires in Alaska using VIIRS I-band data: An improved operational approach for high latitudes // Remote Sensing of Environment. – 2017. – vol. 199. – P. 389-400.
15. Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – vol. 29.4. – P. 1053-1073.

16. Chafer C.J. A comparison of fire severity measures: an Australian example and implications for predicting major areas of soil erosion // *Catena*. – 2008. – vol. 74.3. – P. 235-245.
17. Verbyla D.L., Kasischke E.S., Hoy E.E. Seasonal and topographic effects on estimating fire severity from Landsat TM/ETM+ data // *International Journal of Wildland Fire*. – 2008. – vol. 17.4. – P. 527-534.
18. Morton D.C., DeFries R.S., Nagol J., Souza Jr.C.M., Kasischke E.S., Hurtt G.C., Dubayah R. Mapping canopy damage from understory fires in Amazon forests using annual time series of Landsat and MODIS data // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – vol. 115(7). – P. 1706-1720.

References

1. Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii zashchity naseleniya i territorij Rossijskoj Federacii ot chrezvychajnyh situacij prirodnoho i tekhnogennogo haraktera v 2019 godu». – M.: MCHS Rossii; FGBU VNII GOCHS (FC), 2020. – 259 s.
2. Kasischke E.S. Fire, Climate change, and carbon cycling in the boreal forest. Vol. 138. – Springer Science & Business Media, 2012. – 464 p.
3. Giglio L. Modis collection 6 active fire product user's guide revision A. – Unpublished Manuscript, Department of geographical Sciences University of Maryland, 2015. – 64 p.
4. Jakubauskas M.E., Lulla K.P., Mausel P.W. Assessment of vegetation change in a fire-altered forest landscape // *PE&RS, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 1990. – vol. 56(3). – P. 371-377.
5. White J.E., Ryan K., Key C., Running S. Remote sensing of fire severity and vegetation recovery // *International Journal of Wildland Fire* – 1996. – vol. 6. – P. 125-136.
6. Michalek J.L., Colwell J.E., French N.H.F., Kasischke E.S., Johnson R.D. Using Landsat data to estimate carbon release from burned biomass in an Alaskan spruce forest complex // *International Journal of Remote Sensing* – 2000. – vol. 21. – P. 329-343.
7. Cocke E., Fule P.Z., Crouse J.E. Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data // *International Journal of Wildland Fire*. – 2005. – vol. 14. – P. 189-198.
8. Smith A.M.S., Lentile L.B., Huda A.T., Morgan P. Evaluation of linear spectral unmixing and Δ NBR for predicting post-fire recovery in a North American ponderosa pine forest // *International Journal of Remote Sensing*. – 2007. – Vol. 28. – P. 5159-5166.
9. Lutes D.C. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system / Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 1 CD., 2006.
10. Atlas sel'skogo hozyajstva YAkutskoj ASSR / red. kol.: I.A. Matveev, M.E. Nikolaev, T.D. Sivcev i dr. – M.: GUGK pri SM SSSR, 1989. – 115 s.
11. Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Yin R. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine // *Remote Sensing*. – 2019. – vol. 11(5). – P. 489.
12. Daldegan G.A., Roberts D.A., Ribeiro F. de Figueiredo. Spectral mixture analysis in Google Earth Engine to model and delineate fire scars over a large extent and a long time-series in a rainforest-savanna transition zone // *Remote Sensing of Environment*. – 2019. – vol. 232. – P. 111340.
13. Quintero N., Viedma O., Urbieta I. R., Moreno J.M. Assessing Landscape Fire Hazard by Multitemporal Automatic Classification of Landsat Time Series Using the Google Earth Engine in West-Central Spain // *Forests*. – 2019. – vol. 10(6). – P. 518.
14. Waigl C.F., Stuefer M., Prakash A., Ichoku C. Detecting high and low-intensity fires in Alaska using VIIRS I-band data: An improved operational approach for high latitudes // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – vol. 199. – P. 389-400.
15. Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images // *International Journal of Remote Sensing*. – 2008. – vol. 29.4. – P. 1053-1073.
16. Chafer C.J. A comparison of fire severity measures: an Australian example and implications for predicting major areas of soil erosion // *Catena*. – 2008. – vol. 74.3. – P. 235-245.
17. Verbyla D.L., Kasischke E.S., Hoy E.E. Seasonal and topographic effects on estimating fire severity from Landsat TM/ETM+ data // *International Journal of Wildland Fire*. – 2008. – vol. 17.4. – P. 527-534.
18. Morton D.C., DeFries R.S., Nagol J., Souza Jr.C.M., Kasischke E.S., Hurtt G.C., Dubayah R. Mapping canopy damage from understory fires in Amazon forests using annual time series of Landsat and MODIS data // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – vol. 115(7). – P. 1706-1720.

— ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ —
И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТА

УДК 911.2

DOI 10.25587/SVFU.2022.26.2.004

М.И. Захаров

СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
ОРГАНИЗАЦИИ ПО ГЛАВНЫМ БАССЕЙНАМ ХРЕБТА ОРУЛГАН**

Аннотация. На основе количественного и сравнительно-географического анализа ландшафтной структуры хребта Орулган получены сведения по региональным особенностям хребта Орулган. Хребет Орулган, протянувшийся в субмеридиональном направлении вдоль течения р. Лена, занимает наиболее возвышенную северо-западную часть Верхоянской горной системы. Протяженность хребта в широтном направлении – 270 км, в долготном – до 400 км. Совокупность особенностей совместного проявления климатогенного и криолитогенного фактора хорошо дифференцируется по главному водоразделу хребта, что позволяет выделить три довольно контрастных склона, приуроченных к бассейнам рек Лена, Омолой и Яна. Анализ результатов вычисления ландшафтно-морфологических показателей по главным бассейнам хребта позволили установить различия ландшафтной структуры и разнообразия. На основании изучения их ландшафтной структуры мы пришли к выводу, что различия в них существенные, что, на наш взгляд, соответствует критериям выделения региональных комплексов на уровне физико-географических подпровинций: западной приленской, северо-восточной приомолойской и восточной прирянской. На основе полученных данных в дальнейшем могут быть разработаны аналогичные ландшафтные модели по другим провинциям гор Северо-Востока Сибири.

Ключевые слова: бассейновый подход, районирование, ландшафтная структура, хребет Орулган, Якутия, физико-географическая провинция, подпровинция, бассейн, тип местности, рельеф.

M.I. Zakharov

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

**REGIONAL FEATURES OF THE SPATIAL ORGANIZATION
IN THE MAIN BASINS OF THE ORULGAN RIDGE**

Abstract. On the basis of a quantitative and comparative geographical analysis of the landscape structure of the Orulgan Ridge, information was obtained on the regional features of the Orulgan Ridge. The Orulgan Ridge, stretched in submeridional direction along the Lena River. Lena, occupies the most elevated northwestern part of the Verkhoyansk mountain system. The length of the ridge in the latitudinal direction is 270 km, in the longitudinal direction – up to 400 km. The set of features of the joint manifestation of the climatogenic and cryolithogenic factors is well differentiated along the main watershed of the ridge, which makes it possible to

ЗАХАРОВ Моисей Иванович – ст. преп. Эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: mplusz@inbox.ru

ZAKHAROV Moisey Ivanovich – Senior Lecturer, Ecological and Geographical Division, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: mplusz@inbox.ru

distinguish three rather contrasting slopes confined to the basins of the Lena, Omola and Yana rivers. An analysis of the results of calculating landscape-morphological indicators for the main basins of the ridge made it possible to establish differences in landscape structure and diversity. Based on the study of their landscape structure, we came to the conclusion that the differences in them are significant, which, in our opinion, corresponds to the criteria for distinguishing regional complexes at the level of physiographic subprovinces: western Prilenskaya, northeastern Priyanskaya, and eastern Priyanskaya. Based on the data obtained, similar landscape models can be developed in the future for other provinces of the mountains of Northeast Siberia.

Keywords: basin approach, zoning, landscape structure, Orulgan Ridge, Yakutia, physical-geographical province, sub-province, basin, terrain type, relief.

Введение

В пространственной организации ландшафтов и в дифференциации хозяйственных функций важную роль играют речные бассейны и бассейновые парадинамические комплексы. Кроме того, бассейны рек являются объектами государственного регулирования в рамках бассейновых водных управлений территориальных органов Федерального агентства водных ресурсов межрегионального уровня, в деятельности которого также необходимо учитывать ландшафтную и водохозяйственную структуру водосборных бассейнов. Функционально-структурные связи типологических комплексов в горных условиях наиболее сильно проявляются в рамках локальных водосборных бассейнов, где многие исследователи выделяют формирование бассейновой организации ландшафтов, под которым подразумеваются определенная упорядоченность и целостность ландшафтной структуры в пределах бассейновой структуры [1-3]. В этом случае в пределах горных физико – географических провинций рекомендуется выделять факультативные единицы – *подпровинции*.

Специфика ландшафтной структуры горных сооружений во многом определяется гипсометрическим перепадом высот и экспозиционными различиями. Анализ структуры высотной поясности в пределах горных провинций показывает, что в рамках одного типа поясности нередко формируются его географические варианты. Формирование различных вариантов, может быть обусловлено позиционным фактором (не выходящие за рамки инварианта климатические различия на разных склонах хребта), литологией (варианты поясности на гранитных массивах, известняках и т.д.), а также другими факторами [3]. Макросклоны, определяемые водосборными бассейнами формируют особые условия ландшафтообразования, определяемые, прежде всего, в мезоклиматических и орогенных условиях. Таким образом, в данной работе ставится цель проанализировать ландшафтную структуру хребта Орулган по главным бассейнам и выявить региональные особенности ее пространственной организации.

Объекты и методы

Хребет Орулган, протянувшийся в субмеридиональном направлении вдоль течения р. Лена, занимает наиболее возвышенную северо-западную часть Верхоянской горной системы. Протяженность хребта в широтном направлении – 270 км, в долготном – до 400 км [4]. К главным бассейнам хребта Орулган относятся реки Лена, Омолой и Яна.

Нами изучены количественные ландшафтно-морфологические показатели по этим бассейнам. Всего использовано четыре ландшафтно – морфологических показателей, которые традиционно используются для количественной оценки разнообразия и организации ландшафтов [5]. Согласно мерзлотно-ландшафтному районированию Якутии территория хребта относится к Орулганской среднегорной провинции с преобладанием горноредколесных и горнотундровых ландшафтов (рис. 1).

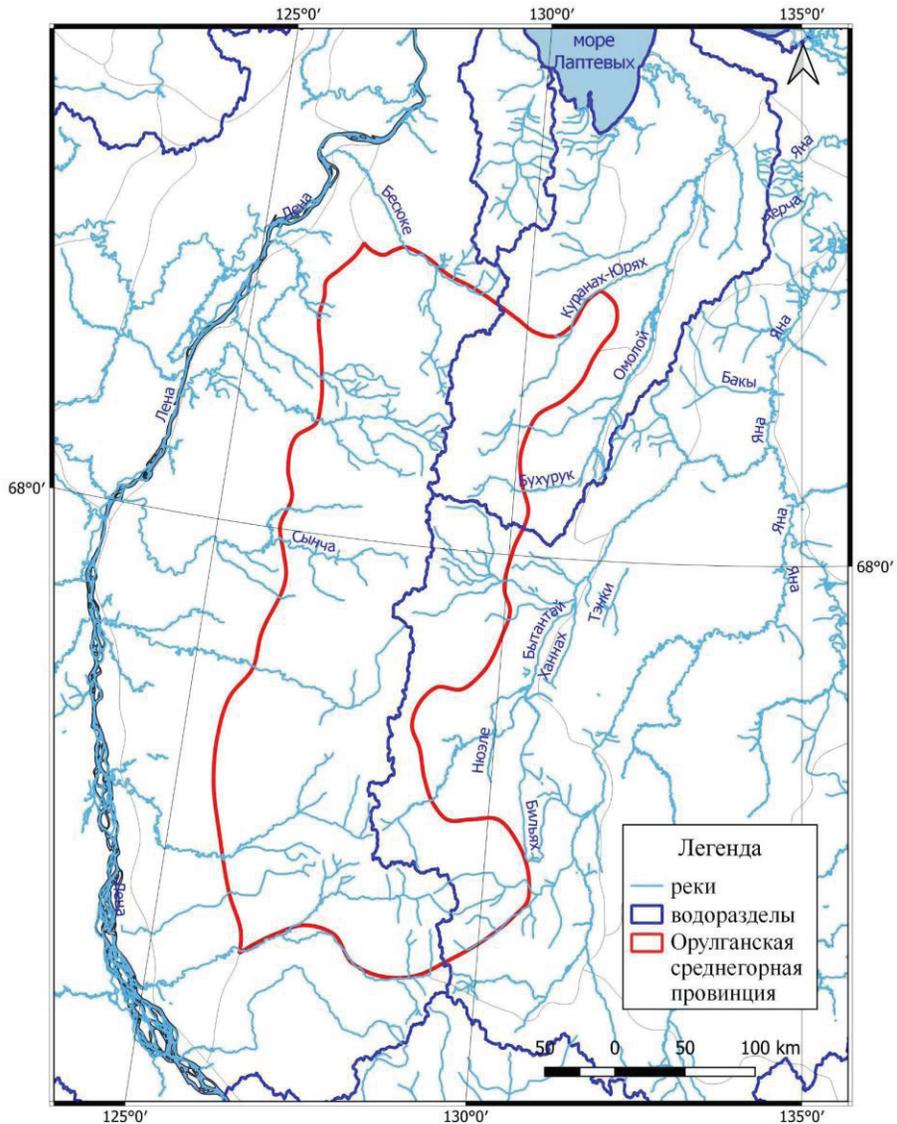


Рис. 1. Главные бассейны хребта Орулган. Данные по водоразделам HydroSHEDS (составлено автором)

Анализ пространственной структуры типов ландшафтов проделан по мерзлотно-ландшафтной карте Орулганской среднегорной провинции, составленной нами по геоинформационному моделированию на платформе Google Earth Engine. Методика составления, которой описана в предыдущей публикации [6]. Отметим, что использование геоинформационного моделирования значительно увеличивает количество ландшафтных контуров, несмотря на применения процедуры «отсеивания» контуров с малыми размерами. Всего на территории хребта выделено 1353 контуров.

Используя инструменты зональной статистики, геообработки и калькулятора полей, рассчитаны следующие показатели: количество типов ландшафтов (m), количество ландшафтных контуров (n), площади главных бассейнов (S) в кв. км., средняя площадь контуров (S_0) в кв. км., площади типов ландшафтов (S_m) в кв. км., индекс дробности ландшафтной структуры ($K = n / S * 100$), энтропийная мера разнообразия Шеннона ($H = -\sum S_m / S * \log(S_m / S)$ [7], максимальная энтропия ($H_{max} = \log(m)$), энтропийный показатель упорядоченности ($R = 1 - H / H_{max}$), длина

водотоков по данным HydroSHEDS (L) в км., амплитуда перепада высот (A) в метрах, коэффициент эрозионной расчлененности ($\square = (1000 * \Delta A L / S)$).

Обсуждение результатов

Различия сложных показателей ландшафтной структуры бассейна могут быть обусловлены геолого-геоморфологическими и климатическими различиями. Так как ландшафтное разнообразие в значительной мере зависит от площади [8], энтропийная мера разнообразия Шеннона имеет относительно высокий показатель в бассейне р.Лена. Два других бассейна примерно одинаковы по размерам. Бассейн р.Яна имеет наименьшее значение ландшафтного разнообразия, что делает структуру более упорядоченной. По коэффициенту эрозионного расчленения можно предположить различия в эрозионно-тектонических процессах бассейнов. Высокое значение свидетельствует об альпийском характере рельефа, поэтому можно сказать, что бассейн Омолоя более всех сохранил следы палеогенового и раннеогенового выравнивания.

Таблица 1 – Ландшафтно-морфологические показатели бассейнов хребта Орулган

	Площадь бассейна, (кв.км) S	Индекс дробности ландшафтной структуры, K	Энтропийная мера разнообразия Шеннона, H	Энтропийный показатель упорядоченности, R	Коэффициент эрозионного расчленения, \square
Бассейн р.Лена	55223	1.691	2.411	0.067	1.7
Бассейн р.Омолоя	10296	1.399	1.856	0.071	1.0
Бассейн р.Яна	16538	1.663	1.808	0.095	1.3

Различия бассейнов рек Омолоя и Яны обусловлены разницей климатических условий. Средняя площадь контуров выше, чем у остальных бассейнов, что коррелируется с низким значением коэффициента эрозионной расчлененности. Бассейн р. Омолоя расположен в северо-восточной части хребта и отличается низким показателем упорядоченности по сравнению с бассейном р.Яна при почти одинаковых значениях индекса разнообразия. Данное различие связано с относительно невысоким перепадом высот по сравнению с Янским бассейном и слабо-выраженной высотной поясностью ландшафтов. Выявленные различия по сложным индексам разнообразия довольно слабо отражают различия ландшафтных структур хребтов, при этом указывая и подтверждая на исследования по неоднородности геолого-геоморфологического строения хребта. Поэтому для дифференциации нами использованы различия в соотношении и спектре представленности типологических комплексов.

Региональные (подпровинциальные) особенности типов местности проанализированы на основе контуров, определенных в Мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия) [9]. Набор типов местности отражает генетические и геолого-геоморфологические различия выделяемых подпровинций (рис. 2).

По генетическому признаку типов местности главные бассейны имеют хорошо выраженные различия, обусловленные неоднородностью проявления ведущих ландшафтообразующих литогенных и климатогенных процессов.

Биоклиматические и гидрологические различия подпровинций отражаются в структуре типов ландшафтов (рис. 3).

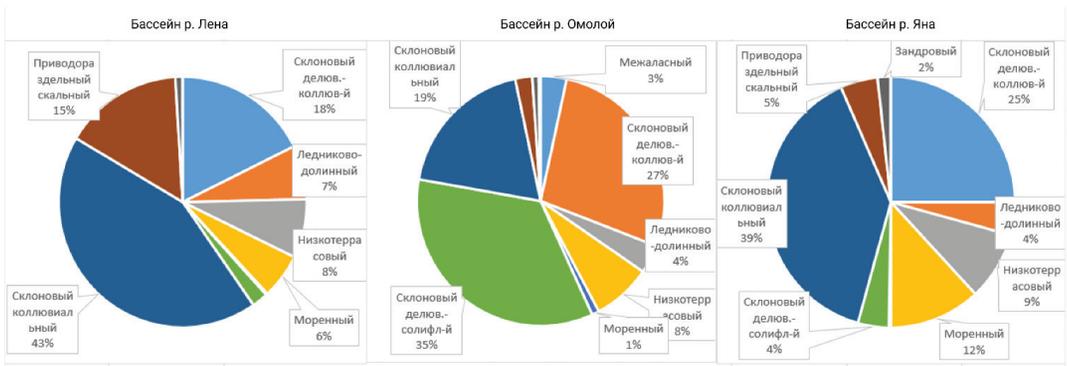


Рис. 2. Соотношение типов местности главных бассейнов Орулганской среднегорной провинции (составлено автором по данным [9])

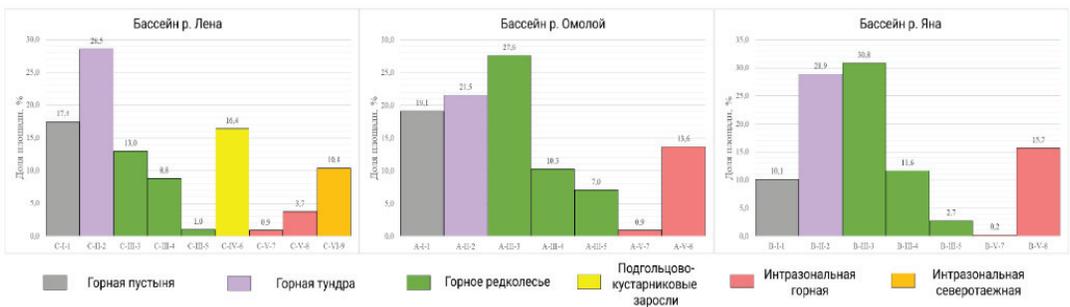


Рис. 3. Соотношения типов ландшафтов Орулганской среднегорной провинции (составлено автором)

Самый крупный Ленский бассейн, несмотря на субмеридиональное распространение и высокое значение ландшафтного разнообразия, характеризуется орографической однородностью высокогорных, среднегорных и низкогорных участков. Доминирующими типами ландшафтов являются горная тундра и горное редколесье. По глубоким поперечным речным долинам широко распространены интразональные северотаежные долинные ландшафты. Подгольцово-кустарниковый тип высотного ландшафта занимает примерно 16,4 % территории бассейна. Генетическая однородность проявляется в структуре типов местности. Склоновый коллювиальный, склоновый делювиально-коллювиальный и приводораздельно-скальный типы местности имеют эрозионно-тектоническое происхождение. Альпийский рельеф формируется при глубоком ледниковом расчленении горного хребта, что объясняет относительно высокую долю ледниково-долинного типа местности (8 %). Склоновый коллювиальный тип местности преобладает в бассейне р.Лена, занимая 43 %. Высокогорные скальные водоразделы с эпилитно-лишайниковыми каменистыми пустынями занимают значительные площади (15 %) в бассейне р.Лена. Склоновый делювиально-коллювиальный тип местности является сопутствующим к склоновым коллювиальным, занимая более пологие нижние части гор (18 %).

В бассейне р. Омолой преобладающим типом местности является склоновый делювиально-солифлюкционный (35 %). Доминирующим типом ландшафтов является горное редколесье, которое отличается относительно высокой долей лиственных редин и марей. Развитие данного типа местности говорит о перенасыщении влагой почвы, что характерно для бассейна р.Омолрой, где растительность представлена марями и лиственными редидами, хотя по существующим данным количеством осадков бассейн р.Омолрой не сильно отличается от аналогичных участков в бассейне Лены и Яны. Субарктический тип климата и скудность

растительного покрова не позволяют почве испарять большую часть поступившей влаги, накапливая ее, что обуславливает развитие соответствующих типологических единиц ландшафтов. Также практически отсутствие крутых склонов создает оптимальные условия для медленного вязкопластичного солифлюкционного течения, который формирует грядовые и валовые мерзлотные формы рельефа. Ледниково-аккумулятивные типы местности для бассейна р.Омолрой нехарактерны, при этом имеется межлассный тип местности, свидетельствующий о большом объеме льдистости грунта и развитии термокарстовых форм рельефа.

Бассейн р. Яна сформирован в сочетании типов местности эрозионно-тектонического и ледниково-аккумулятивного происхождения. Моренный тип местности занимает значительные площади (12 %) низкогорий хребта, тем самым предопределяя переход хребта к Приверхоянской моренной провинции [10]. В соотношении типов ландшафтов преобладает горное редколесье. Моренному типу местности сопутствуют зандровые равнины, занимающие наиболее открытые поверхности выравнивания. На среднегорьях и низкогорьях восточного склона в целом преобладают холмисто-грядовые формы ледникового, моренного происхождения, контрастирующие со скальными и альпийскими формами высокогорий.

Заключение

На основе анализа ландшафтной структуры типов (подтипов) ландшафтов Орулганской среднегорной провинции получены ландшафтно-морфометрические показатели разнообразия и организации мерзлотных ландшафтов по главным бассейнам хребта. На основании изучения их ландшафтной структуры мы пришли к выводу, что различия в них существенные, что, на наш взгляд, соответствует критериям выделения региональных комплексов на уровне физико-географических подпровинций: *западной приленской, северо-восточной приомолойской и восточной прианской.*

Западная приленская подпровинция. Доминирующими типами ландшафтов являются горная тундра и горное редколесье, что говорит о высокогорности территории бассейна. Наиболее распространенные типы местности – склоновый коллювиальный и склоновый делювиально-коллювиальный.

Северо-Восточная приомолойская подпровинция. Данная часть хребта менее всего подвергалась четвертичному поднятию, и поэтому здесь лучше сохранились поверхности выравнивания с преобладающим развитием моренных и водно-ледниковых отложений. Поэтому территория больше представлена горным редколесьем, причем слабый дренаж и северное расположение бассейна приводят к увеличению доли более увлажненных марей и листовенных моховых редиин.

Восточная прианская подпровинция. Бассейн включает области тектонических поднятий со значительными площадями поверхностей выравнивания и надпойменных террас современных рек. В соотношении типов ландшафтов доминирует горное редколесье. Горная тундра преобладает, доходя до самых вершин, из-за чего доля горных пустынь незначительна.

Литература

1. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. – Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. – 163 с.
2. Халатов В.Ю. Интерференция ландшафтной и бассейновой структур горных территорий (на примере Армянского нагорья): автореф. дис. д.г.н. – Халатов Виталий Юрьевич. – М., 2004. – 48 с.
3. Черных Д.В. Пространственно-временная организация внутриконтинентальных горных ландшафтов (на примере Русского Алтая): автореф. дис. д.г.н. – Черных Дмитрий Владимирович. – Томск, 2012. – 51 с.
4. Северная Якутия. Морской транспорт. – Л.: Труды АНИИ, 1960. – 280 с.
5. Плюснин В.М. Ландшафтный анализ горных территории (на примере Прибайкалья): автореф. дис. д.г.н. – Плюснин Виктор Максимович. – Иркутск, 2000. – 40 с.

6. Zakharov M., Cherosov M., Troeva E., Gadal S. Vegetation cover analysis of the mountainous part of north-eastern Siberia by means of geoinformation modelling and machine learning (basic principles, approaches, technology and relation to geosystem science) // BIO Web of Conferences, Northern Asia Plant Diversity. – 2021. – № 38 – 5 p.

7. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 832 с.

8. Ганзей К.С. Оценка ландшафтного разнообразия вулканически активных островов / К.С. Ганзей // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2014. – № 2. – С.61-70.

9. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000 / Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Макаров В.С. [и др.]; гл. ред. М.Н. Железняк – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. – 2 с.

10. Федоров А.Н. Эволюция и динамика мерзлотных ландшафтов Якутии: автореф. дисс. д.г.н. – Федоров Александр Николаевич. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2020. – 37 с.

References

1. Korytnyj L.M. Bassejnovaya koncepciya v prirodopol'zovanii. – Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii SO RAN, 2001. – 163 s.

2. Halatov V.YU. Interferenciya landshaftnoj i bassejnovoj struktur gornyh territorij (na primere Armyanskogo nagor'ya): avtoref. dis. d.g.n. – Halatov Vitalij YUr'evich. – M., 2004. – 48 s.

3. CHernyh D.V. Prostranstvenno-vremennaya organizaciya vnutrikontinental'nyh gornyh landshaftov (na primere Russkogo Altaya): avtoref. dis. d.g.n. – CHernyh Dmitrij Vladimirovich. – Tomsk, 2012. – 51 s.

4. Severnaya YAkutiya. Morskoj transport. – L.: Trudy ANII, 1960. – 280 s.

5. Plyusnin V.M. Landshaftnyj analiz gornyh territorii (na primere Pribajkal'ya): avtoref. dis. d.g.n. – Plyusnin Viktor Maksimovich. – Irkutsk, 2000. – 40 s.

6. Zakharov M., Cherosov M., Troeva E., Gadal S. Vegetation cover analysis of the mountainous part of north-eastern Siberia by means of geoinformation modelling and machine learning (basic principles, approaches, technology and relation to geosystem science) // BIO Web of Conferences, Northern Asia Plant Diversity. – 2021. – № 38 – 5 p.

7. SHennon K. Raboty po teorii informacii i kibernetike. – M.: Izdatel'stvo inostranoj literatury, 1963. – 832 s.

8. Ganzej K.S. Ocenka landshaftnogo raznoobraziya vulkanicheski aktivnyh ostrovov / K.S. Ganzej // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya. – 2014. – № 2. – С.61-70.

9. Merzlotno-landshaftnaya karta Respubliki Saha (YAkutiya). Masshtab 1: 1 500 000 / Fedorov A.N., Torgovkin YA.I., SHestakova A.A., Vasil'ev N.F., Makarov V.S. [i dr.]; gl. red. M.N. ZHeleznyak – YAkutsk: IMZ SO RAN, 2018. – 2 s.

10. Fedorov A.N. Evolyuciya i dinamika merzlotnyh landshaftov YAkutii: avtoref. diss. d.g.n. – Fedorov Aleksandr Nikolaevich. – YAkutsk: IMZ SO RAN, 2020. – 37 s.

— ГИДРОЛОГИЯ —

УДК 504.455:502

DOI 10.25587/SVFU.2022.26.2.005

И.И. Жирков, Т.П. Трофимова

СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

САПРОПЕЛЕВЫЕ РЕСУРСЫ ОЗЕРА КУБАЛАХ Г. ЯКУТСКА

Аннотация. В статье рассматриваются результаты геологического изучения (поиска и оценки) месторождения сапропеля на участке недр «Озеро Кубалах» (38 км автодороги «Виллой»). Выявление запасов сапропелевых отложений озера включает комплекс различных исследований, таких как геолого-гидрогеологические описание объекта исследования, зондировочное бурение, опробовательские, топографо-геодезические и лабораторные работы.

Зондировочное ручное бурение проводилось со льда с целью уточнения границ месторождения, получения данных о свойствах, условиях залегания, мощностях отложений. Зондировочная сеть озера состояла из пяти поперечников при площади озера 34,89 га, расположенных параллельно через 180 метров. По поперечникам заложен пикетаж через 40 метров. На каждом пикете производилось зондирование залежи с одновременным определением мощности сапропеля, глубины воды и характера минерального дна.

В результате исследования выявлено, что в участке недр развиты зоогеново-водорослевый, смешанно-водорослевый и диатомовый виды сапропелей. Мощность отложений изменяется от 0,3 до 2,60 м, составляя в среднем 1,66 м. Основная залежь сапропели сосредоточена в северном конце озера. Агрохимические показатели сапропелевых отложений: зольность – 38,8, влажность – 80,52, органическое вещество – 30,85 %; азот общий – 0,89, оксид калия – 0,17, оксид кальция – 4,32, оксид фосфора – 0,16 % на АВС. Концентрация 9 микроэлементов-металлов, в том числе кадмия, мышьяка, ртути, свинца установлена в пределах допустимых концентраций. Исследования на ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{137}Cs показали радиологическую безопасность сапропелевых отложений озера. Бактериологические исследования сапропелей показали отсутствие возбудителей сальмонеллеза, сибирской язвы, анаэробной и синегнойной микрофлоры, патогенного протей, кишечной палочки.

Подсчитанные геологические запасы сапропелей составили 525,8 тыс. м³, балансовые запасы сапропелевых отложений по категории С₁ – 301,2 тыс. м³.

Ключевые слова: озеро, сапропелевые отложения, зондировочные скважины, подсчёт запасов, физико-химический и биохимический состав, балансовый и геологический запасы.

ЖИРКОВ Иннокентий Иннокентьевич – к.г.н., доцент, научный руководитель ЛОЗ Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: yklimno@mail.ru

ZHIRKOV Innokenti Innokentyevich – Candidate of Geographical Science, Associate Professor, Scientific Director, Laboratory of Limnology, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: yklimno@mail.ru

ТРОФИМОВА Тамара Петровна – зав. ЛОЗ Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: tamara-tro67@mail.ru

TROFIMOVA Tamara Petrovna – Head of the Laboratory of Limnology, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: tamara-tro67@mail.ru

I.I. Zhirkov, T.P. Trofimova

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

SAPROPEL RESOURCES OF LAKE KUBALAKH, YAKUTSK

Abstract. The article discusses the results of a geological study (search and evaluation) of sapropel deposit in the subsurface area “Lake Kubalakh” (38 km of the Vilyui motorway). The identification of sapropel deposits of the lake includes a complex of various studies, such as geological and hydrogeological description of the object of study, sounding drilling, testing, topographic and geodetic and laboratory work.

Probing manual drilling was carried out from the ice in order to clarify the boundaries of the deposit, to obtain data on the properties, conditions of occurrence, and capacities of deposits. The sounding network of the lake consisted of five cross-sections with a lake area of 34.89 hectares, located in parallel through 180 meters. A picket line is laid across 40 meters. At each picket, the deposits were probed with simultaneous determination of sapropel power, water depth and the nature of the mineral bottom.

The results of the study revealed that zoogenic-algal, mixed-algal and diatom sapropel species are developed in the subsurface area. The thickness of the deposits varies from 0.3 to 2.60 m, averaging 1.66 m. The main sapropel deposit is concentrated at the northern end of the lake. Agrochemical indicators of sapropel deposits: ash content – 38.8, humidity – 80.52, organic matter – 30.85 %; total nitrogen – 0.89, potassium oxide – 0.17, calcium oxide – 4.32, phosphorus oxide – 0.16 % on ABC. The concentration of 9 trace elements-metals, including cadmium, arsenic, mercury, lead is set within the permissible concentrations. Studies on ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th and ¹³⁷Cs have shown the radiological safety of sapropel deposits of the lake. Bacteriological studies of sapropels have shown the absence of pathogens of salmonellosis, anthrax, anaerobic and pseudomonas microflora, pathogenic proteus, E. coli.

The estimated geological reserves of sapropels amounted to 525.8 thousand m³, the balance reserves of sapropel deposits in category C₁ – 301.2 thousand m³.

Keywords: lake, sapropel deposits, sounding wells, reserves calculation, physico-chemical and biochemical composition, balance and geological reserves.

Введение

Исследуемый участок недр расположен на территории городского округа «Город Якутск» Республики Саха (Якутия) в 37,2 км к западу от г. Якутска, в 1,2 к ЮЗ от 38 км Виллюйского тракта. В гидрологическом отношении озеро относится бассейну речки Куранах, правого притока р. Кенгкеме, Лено-Кенгкеминского водораздела. Площадь объекта исследования составляет 34,89 га. Географические координаты участка работ даны в табл. 1.

Таблица 1 – Географические координаты участка работ

№ № точек	Северная широта			Восточная долгота		
	градусы	минуты	секунды	градусы	минуты	секунды
1	62	03	27	129	06	34
2	62	03	20	129	06	55
3	62	02	59	129	07	00
4	62	02	51	129	06	34
5	62	03	11	129	06	28

Морфометрические показатели исследованного озера: длина – 1,338 км, ширина (максимальная) – 0,443 км, средняя глубина воды – 1,07 м, максимальная глубина – 1,7 м, объем воды – 254,9 тыс. м³.

Основная цель поисково-оценочных работ по категории C_1 – подсчёт геологических и балансовых запасов и оценка качества выявленных сапропелевых отложений озера Кубалах. Для оценки сапропелевой залежи было пробурено 30 зондировочных скважин ручного бурения по озеру (рис. 1).

Для решения предусмотренных задач на участке недр выполнен комплекс гидрографических, топографо-геодезических работ, зондировочного бурения, лабораторных и камеральных работ (табл. 2).



Рис. 1. Заложение поперечников и точек (скважин) для зондировки сапропелевых отложений.

Таблица 2 – Сводный перечень выполненных работ

№	Виды, методы, способы, условия производства	Единица измерения	Фактический объем
1	2	3	4
1.	Проектирование	проект	1
2.	Гидрографическое обследование территории	км	4,3
3.	Привязка точек зондирования	точка	30
4.	Мензольная съёмка	км ²	0,35
5.	Ручное бурение ледяного покрова льда	точка	30
6.	Зондировочное ручное бурение донных отложений	точка	30
7.	Опробование сапропелевых отложений	проба	18
8.	Опробование воды	проба	2
9.	Морфологическое описание донных проб	проба	6
10.	Агрохимический анализ сапропелевых отложений	проба	3

1	2	3	4
11.	Атомно-абсорбционный спектральный анализ (ААС) сапропелевых отложений на металлы	проба	3
12.	Анализ на радиационную безопасность	проба	3
12.	Микроскопическое описание сапропелевых отложений на водоросли	проба	3
13.	Микробиологическое тестирование сапропелевых отложений на наличие патогенных бактерий, микробов, личинок, яиц, куколок	проба	8
14.	Физико-химический анализ воды	проба	2
15.	Камеральные работы	отчёт	1
16.	Составление геологического отчёта	отчёт	1

Материалы и методы исследования

Материалами исследования являются пробы отложений и пробы водной массы для разных целей определения, отображенных в табл. 2.

Лабораторные работы по оценке качества сапропелевых ресурсов проводились в Испытательной лаборатории ГБУ РС (Я) «Служба земледелия РС (Я)». Санитарно-микробиологические характеристики анализировались в ГБУ РС (Я) «Якутская республиканская ветеринарно-испытательская лаборатория». Анализы физико-химических показателей воды проводились в Аккредитованном испытательском лабораторном центре ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в РС (Я)» и Лаборатории озерадения ИЕН СВФУ (аналитик Т.П. Трофимова).

Агрохимические, полуколичественные спектральные анализы донных осадков проводятся по гостированным методикам [1-9]. Анализы радиационной безопасности сапропелевых отложений проведены в соответствии с требованиями ГОСТов [10-12].

Состав озерной воды изучается химико-аналитическими и спектроскопическими методами согласно гостированным методикам [13-14].

Спектроскопические анализы проводятся с помощью «Лаборатории контроля воды» на основе спектрометра «Lambda-20» (Perkin-Elmer), атомно-абсорбционного спектрометр «Квант Z. ЭТА». Используются также анализатор жидкости «Флюорат-02М», система капиллярного электрофореза «Капель-105М» и жидкостной хроматограф «Люмахром». При определении радиационной безопасности сапропелевых отложений используется спектрометрический комплекс УСК «Гамма плюс».

Результаты исследования

Строение, состав и качество сапропелевых залежей озера Кубалах. Поскольку озеро расположено в относительно широкой долине таежной речки в пределах междуречья Лены и Кенгеме, достаточно разветвлённой и неглубоко врезанной, в водном режиме этой озерно-долинной системы много общего с типичными «травянистыми речками» («от-юряхами»), которые, как известно, изобилуют небольшими озерами, характеризуются преимущественно сезонным стоком, отсутствием глубоко врезанных русел водотоков. Все влекомые частицы из приточных и проточных вод аккумулируются в озерах плесового типа и способствуют формированию озерных осадков, обогащенных растительными остатками, в том числе детритом.

В зимний сезон такие озера весьма интенсивно обедняются кислородом, разложение органики, особенно растительных остатков, в том числе детрита, идет по бескислородному варианту, с преобладанием сероводородной составляющей гниения.

Наличие оливковых озерных отложений, возможно, близких по долгодействию к оливковым сапропелям, свидетельствует о явном богатстве озера зоогеновыми и фитопланктонными

организмами, накапливающимися достаточно интенсивно за летние благоприятные сезоны их массового продуцирования.

Изученный разрез донных отложений озера Кубалах сложен преимущественно водорослевыми сапропелями с незначительной примесью терригенного материала (песка и глины) в отдельных прослойках. Анализ рассмотренного разреза позволяет выделить в нем три главные части. В нижнем слое (до 1,0 см) нижней части встречаются разнородные кварцевые пески с прослоями лигнитов, что указывает на до озерную историю котловины. По остальной высоте разреза встречаются окрашенные (преимущественно оливковые), тонко – до микрослоистых, сапропелевые отложения.

Озерное месторождение сапропеля имеет единую нулевую границу сапропелевых отложений и состоит из одного технологического участка в границе промышленной глубины сапропелевой залежи. Залежь на озерном месторождении слагает сапропели 2-х классов – органический и кремнистый, причем объем кремнистого класса достигает 72 % от общего объема сапропеля, таким образом, по сложности строения относится ко второй категории сложности.

Общий (геологический) объем сапропелевой залежи – 525,8 тыс. м³. Общие запасы в пересчете на 60 % условную влагу – 275,0 тыс. тонн. Балансовый объем сапропелевой залежи – 301,2 тыс. м³, запасы в пересчете на 60 % условную влагу – 157,5 тыс. тонн. Средняя мощность сапропелевых отложений составляет 1,66 м, максимальная – 2,6 м.

Средние качественные показатели балансовых запасов сапропеля: зольность – 38,8 %, влага – 80,52 %, органическое вещество – 30,85 %, оксид кальция – 4,32 %, азот общий – 0,89 %, обменная кислотность – 8,03 ед. рН (солевой). Количественные показатели сапропелевых залежей отображены в табл. 3.

Таблица 3 – Качественная характеристика запасов сапропеля

Показатели/свойства	Наименование запасов и видов сапропеля					
	Общие (геологические) запасы в границе месторождения сапропеля			Балансовые запасы в промышленной глубине		
Площадь, га	34,9			34,9		
Средняя глубина, м	1,43			1,43		
Объём тыс. м ³ запас при 60 % условной влажн.	538,0 283,25			538,0 283,25		
	Миним.	Средняя	Максим.	Миним.	Средняя	Максим.
Зольность на АСВ, %	18,9	38,8	77,9	18,9	38,8	77,9
Влага, %	64,5	80,52	85,6	64,5	80,52	85,6
Органическое вещество, %	11,1	30,85	40,6	11,1	30,85	40,6
Отношение C:N	19,9	38,65	57,9	19,9	38,65	57,9
Обменная кислотность, ед. рН	7,6	8,03	8,4	7,6	8,03	8,4
Азот общий, % на АСВ	0,5	0,89	1,8	0,5	0,89	1,8
Оксид кальция, % на АСВ	2,33	4,32	7,69	2,33	4,32	7,69
Оксид калия, % на АСВ	0,05	0,17	0,41	0,05	0,17	0,41
Оксид фосфора, % на АСВ	0,08	0,16	0,22	0,08	0,16	0,22
<i>Тяжелые металлы:</i>						
Кобальт, мг/кг	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Никель, мг/кг	<0,2	1,72±0,8	4,7±1,4	<0,2	1,72±0,8	4,7±1,4
Ртуть, мг/кг	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Хром общий, мг/кг	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

Продолжение таблицы 3

Медь, мг/кг	0,1919	0,2303	0,2718	0,1919	0,2303	0,2718
Цинк, мг/кг	6,259	11,138	18,586	6,259	11,138	18,586
Кадмий, мг/кг	0,044	0,166	0,695	0,044	0,166	0,695
Свинец, мг/кг	0,32,12	0,6719	1,1874	0,32,12	0,6719	1,1874
Марганец, мг/кг	34,75	89,345	158,2	34,75	89,345	158,2

Наибольшие запасы сапропеля приходятся на кремнистый класс сапропеля (до 72 % от общих запасов), который выявлен повсеместно по всей акватории озера. Представлен данный класс сапропеля диатомовым видом сапропеля. Средний слой залежи (диапазон 30-50 см) представлен смешанно-водорослевым видом, верхняя часть залежи (до 30 см) – зоогеново-водорослевым видом, которые относятся к органическому классу сапропеля.

Сапропель месторождения характеризуется следующим биологическим составом: диатомовые – 60-80 %, зеленые – 20-40 %, десмидиевые – единицы, золотистые – отсутствуют, синезеленые – единицы, желто-зеленые – единицы, высшие водные растения – до 15 %, споры и пыльца растений – до 5 %, остатки животных – до 5 %.

По своим качественным показателям все балансовые запасы сапропеля на озерном месторождении сапропеля «Кубалах» можно рекомендовать к использованию в качестве органо-кремнеземистого сапропеля в качестве удобрения.

Развитие фито- и зоопланктонных организмов, а также высших водных растений, активно сорбирующих металлы и последующее их биохимическое разложение способствуют в накоплении их в донных отложениях. Концентрации металлов в сапропелях закономерно должны быть выше, чем в водных толщах. Несмотря на это концентрации микроэлементов в сапропелевых отложениях исследуемого озера незначительны и находятся в комфортных величинах для освоения биотой. Анализ содержания и распределения микроэлементов в сапропелях озера Кубалах позволяет констатировать, что исследуемые сапропели обеднены микроэлементами, но богаче, чем почвы.

Микробиологическая характеристика сапропелей озера. По данным Якутской республиканской ветеринарно-испытательной лаборатории при микроскопическом исследовании проб сапропелевых отложений озера Кубалах створы яйца и личинки гельминтов не обнаружены.

Микробиологические анализы на возбудителей золотистого стафилококка (*Staphylococcus aureus*), анаэробных бактерий, патогенных микроорганизмов, в том числе сальмонелл, протей, на наличие синегнойной палочки, энтеропатогенной кишечной палочки показали отрицательные штампы, то есть их отсутствие в анализируемых пробах сапропелевых отложений.

Гуминовые кислоты, компоненты битумов оказывают бактерицидное действие на условно-патогенную микрофлору. В комплексе с микробами-антагонистами (плесневыми грибами рода *Penicillium*, бактериями рода *Bacillus* и *Pseudomonas*) они обуславливают антимикробный потенциал маломинерализованных пелоидов. Сапропели оказывают бактерицидный эффект в отношении бактерий группы кишечной палочки, золотистого и белого стафилококка, синегнойной палочки, протей, что и доказано лабораторными исследованиями.

Исследованные слои сапропелевых отложений озера Кубалах не содержат болезнетворной и патогенной микрофлоры и являются безопасными при приготовлении сапропелепродуктов.

Радиационная характеристика донных отложений озера. В сапропелевых отложениях озера Кубалах изучены радионуклиды (калий-40, радий-226, торий-232, цезий-137), которые не превышают предельно-допустимые концентрации (ПДК), содержатся в малых количествах. Исследование сапропелевых отложений озера показало естественное природное, в основном биологическое, происхождение изученных радиоактивных элементов, накопленных в донных отложениях в процессе биологической адсорбции гидробионтов, их последующим отмиранием и вовлечением в донные отложения.

Заключение

В ходе выполнения поисково-оценочных работ получено следующее:

- донные отложения озера представлены сапропелевыми отложениями органо-кремнистого класса. В месторождении развиты зоогеново-водорослевый, смешанно-водорослевый и диатомовый виды сапропелей. Мощность отложений изменяется от 0,3 до 2,60 м, составляя в среднем 1,66 м. Основная залежь сапропеля сосредоточена в северном конце озера;
- подсчёт запасов сапропелевых залежей озера по категории С₁. Геологические запасы озера Кубалах составляют: 525,8 тыс. м³. Балансовые запасы залежи – 301,2 тыс. м³, запасы в перерасчете на 60 % условную влагу – 157 572 т.;
- вода озера Кубалах не насыщена металлами и загрязняющими органическими веществами, гидрокарбонатно-натриево-калиевого солевого состава, имеет «мягкую» жесткость и минерализацию до 230 мг/л.;
- агрохимические показатели сапропелевых отложений озера Кубалах невысокие, по сравнению с другими исследованными лабораторией сапропелевыми месторождениями Центральной Якутии;
- исследования на содержание 9 микроэлементов установило, что все тяжелые металлы в образцах используемого сапропеля присутствуют в допустимых концентрациях;
- исследования на ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th и ¹³⁷Cs показали радиологическую безопасность сапропелевых отложений озера;
- бактериологические исследования сапропелей показали отсутствие возбудителей сальмонеллеза, сибирской язвы, анаэробной и синегнойной микрофлоры, патогенного протей, кишечной палочки. Следовательно, сапропель озера можно использовать как экологически чистую добавку биологически активных веществ в рационы сельскохозяйственных животных и птицы, а также в качестве удобрений под сельскохозяйственные культуры. При применении сапропеля в животноводстве в качестве кормовых добавок, у животных повышается естественная сопротивляемость организма к заболеваниям, увеличивается продуктивность и прирост живой массы. При скармливании сапропеля скоту проявляются лечебные свойства, животные выздоравливают, тем самым снижая затраты на медикаменты;
- сапропелевые отложения по содержаниям органических остатков не очень высокого качества. По данным К.П. Иванова средняя скорость сапропеля в Центральной Якутии около 1 мм в год. Так что для накопления сапропеля мощностью 1 м необходимо (без существенных изменений лимнологических условий озера) около 1000 лет;
- в долгоживущих, богатых водной живности озёрах скорость накопления озёрных осадков может быть и выше. В озере Кубалах эта скорость могла быть даже ниже, так как озеро окружают обширные маревые ландшафты, откуда преимущественно поступали холодные и обогащенные гуминовыми кислотами воды, не способствующие интенсивному развитию водной живности;
- но, с другой стороны, в благоприятные периоды растительная и животная планктонная жизнь становилась, видимо, более продуктивной, так как в основных слоях сапропелевые отложения обладают некоторой тиксотропностью (студнеподобием);
- считаем, что некоторые участки месторождения (по площади) и некоторые слои (по вертикали) могут быть пригодными для гранулирования, хотя эти гранулированные удобрения – весьма дефицитная продукция, но само внедрение методики гранулирования – дело высокозатратное. Чтобы решиться на него нужны предварительные очень серьезные экономические расчёты.

Литература

1. ГОСТ 26712-94. Удобрения органические. Общие требования к методам анализа.

2. ГОСТ 26713-85. Удобрения органические. Метод определения влаги и сухого остатка.
3. ГОСТ 26714-85. Удобрения органические. Метод определения золы.
4. ГОСТ 26715-85. Удобрения органические. Методы определения общего азота.
5. ГОСТ 26716-85. Удобрения органические. Метод определения аммонийного азота.
6. ГОСТ 26717-85. Удобрения органические. Метод определения общего азота.
7. ГОСТ 26718-85. Удобрения органические. Метод определения общего калия.
8. РД 52.18.289-90. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом.
9. Руководство по санитарно-химическому исследованию почвы (нормативные документы). – М.: ЦИНАО, 1993. – 130 с.
10. МВИ № 40090.3Н700 от 22.12.2003 г. ГНЦМ «ВНИИФТРИ» Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектра с программным обеспечением «ПРОГРЕСС».
11. МУ 31-11/05 п.7 п.11. Методика выполнения измерений массовых концентраций ртути методом ИВА на анализаторах типа ТА.
12. МУ 31-18/06. Методика выполнения измерений массовых концентраций никеля и кобальта методом ИВА на анализаторах типа ТА.
13. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Часть 1 / под ред. Л.В. Боевой. – Ростов-на-Дону: Изд-во НОК, 2009. – 1045 с.
14. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Часть 2 / под ред. Л.В. Боевой. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – 720 с.

References

1. 1. GOST 26712-94. Udobreniya organicheskie. Obshchie trebovaniya k metodam analiza.
2. GOST 26713-85. Udobreniya organicheskie. Metod opredeleniya vlagi i suhogo ostatka.
3. GOST 26714-85. Udobreniya organicheskie. Metod opredeleniya zoly.
4. GOST 26715-85. Udobreniya organicheskie. Metody opredeleniya obshchego azota.
5. GOST 26716-85. Udobreniya organicheskie. Metod opredeleniya ammonijnogo azota.
6. GOST 26717-85. Udobreniya organicheskie. Metod opredeleniya obshchego azota.
7. GOST 26718-85. Udobreniya organicheskie. Metod opredeleniya obshchego kaliya.
8. RD 52.18.289-90. Metodicheskie ukazaniya. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj doli podvizhnyh form metallov (medi, svinca, cinka, nikelya, kadmiya, kobal'ta, hroma, marganca) v probah pochvy atomno-absorbcionnym analizom.
9. Rukovodstvo po sanitarno-himicheskomu issledovaniyu pochvy (normativnye dokumenty). – М.: CINAО, 1993. – 130 s.
10. MVI № 40090.3N700 ot 22.12.2003 g. GNСM «VNIIFTRI» Metodika izmereniya aktivnosti radionuklidov s ispol'zovaniem scintillyacionnogo gamma-spektra s programmym obespecheniem «PROGRESS».
11. MU 31-11/05 p.7 p.11. Metodika vypolneniya izmerenij massovyh koncentracij rtuti metodom IVA na analizatorah tipa TA.
12. MU 31-18/06. Metodika vypolneniya izmerenij massovyh koncentracij nikelya i kobal'ta metodom IVA na analizatorah tipa TA.
13. Rukovodstvo po himicheskomu analizu poverhnostnyh vod sushi. CHast' 1 / pod red. L.V. Boevoj. – Rostov-na-Donu: Izd-vo NOK, 2009. – 1045 s.
14. Rukovodstvo po himicheskomu analizu poverhnostnyh vod sushi. CHast' 2 / pod red. L.V. Boevoj. – Rostov-na-Donu: Izd-vo YUFU, 2012. – 720 s.

— ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, — ПОЛИТИЧЕСКАЯ И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 911.3

DOI 10.25587/SVFU.2022.26.2.006

В.Ю. Кузин

СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

РЕГИОНОПОЛИЗАЦИЯ В ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ: НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ

Аннотация. В статье рассматривается специфика региональных центров Дальневосточного федерального округа. Указывается на сложный и противоречивый характер его социально-экономического развития в постсоветский период. При этом отмечено явное усиление процесса регионополизации – практики доминирования в социальном и экономическом аспектах регионального центра. Влияние регионального центра далеко выходит за административную роль, формируя резко доминирующий центр – регионополис. Данный процесс понимается как спроецированный на региональный уровень более сложный процесс метрополизации. Отмечаются дефиниции и сущность последнего. На основе анализа долей некоторых статистических показателей (численность населения, инвестиции в основной капитал, наличие основных фондов организаций, ввод жилых домов, оборот розничной торговли) из сборников «Регионы России. Основные социально-экономические характеристики городов» за 2010, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 гг. делается вывод об усилении регионополизации во всех регионах Дальневосточного федерального округа. Это, в свою очередь, является следствием сложного процесса пространственной поляризации. Её усиление произошло вследствие возрастания факторов конкурентоспособности регионов в рыночных условиях. Отмечается очевидное противоречие в федеральном округе – фактического формирования мегарегиона (надагломерационной формы урбанизации) не за счёт усложнения экономики, новейших технологий, креативного класса, а за счёт притивизации и деградации территории, сопровождаемое пространственным сжатием. Делается вывод об объективном характере регионополизации, административное воздействие на которого потенциально опасно из-за возможных неверных управленческих решений. В то же время формирующаяся новая картина социально-экономического развития создаёт новые возможности на территории Дальневосточного федерального округа.

Ключевые слова: Дальневосточный федеральный округ, регион, фактор, конкурентные преимущества, регионополизация, региональный центр, поляризация, метрополизация, мегарегион, перспективы.

КУЗИН Вадим Юрьевич – к.г.н., доцент Эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: vadim-13.06@yandex.ru

KUZIN Vadim Yurievich – Candidate of Geography Science, Associate Professor, Ecological and Geographical Division, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: vadim-13.06@yandex.ru

V.Yu. Kuzin

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

REGIONOPOLIZATION IN THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT: SOME ASPECTS

Abstract. The article deals with the specifics of the regional centers of the Far Eastern Federal District. The complex and contradictory nature of its socio-economic development in the post-Soviet period is pointed out. At the same time, a clear strengthening of the process of regionalization was noted – the practice of dominance in the social and economic aspects of the regional center. The influence of the regional center goes far beyond the administrative role, forming a sharply dominant center – the regionopolis. This process is also understood as a more complex process of metropolization projected onto the regional level. The definitions and essence of the latter are noted. Based on the analysis of the shares of some statistical indicators (population, investments in fixed capital, the presence of basic backgrounds of organizations, the commissioning of residential buildings, retail trade turnover) from the collections “Regions of Russia. Main socio-economic characteristics of cities” for 2010, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 the conclusion is made about the strengthening of regionalization in all regions of the Far Eastern Federal District. This, in turn, is a consequence of the complex process of spatial polarization. Its strengthening was due to the increase in the factors of competitiveness of regions in market conditions. There is an obvious contradiction in the federal district – the actual formation of a mega-region (a supra-agglomeration form of urbanization) not due to the complexity of the economy, the latest technologies, the creative class, but due to the privatization and marginalization of the territory, accompanied by spatial compression. The conclusion is made about the objective nature of regionalization, the administrative impact on which is potentially dangerous due to possible incorrect management decisions. At the same time, the emerging new picture of socio-economic development creates new opportunities in the Far Eastern Federal District..

Keywords: Far Eastern Federal District, region, factor, competitive advantages, regionalization, regional center, polarization, metropolization, mega-region, prospects.

Введение

Социально-экономическое развитие регионов дифференцируется под влиянием спектра факторов, которые также взаимовлияют друг на друга. Осложняется это и взаимоналожением унаследованного развития («фактор колеи») и глобализационными трендами, всё активнее проявляющие себя не только на мировом уровне. В результате траектории регионального развития могут существенно изменяться, особенно если также влияют и политические факторы.

В сущности, так и произошло с постсоветской Россией, испытавшей шоковые политико-экономико-социальные преобразования в короткое время. В результате пространственное развитие страны стало всё более неравномерным, на что повлияло и включение в мировой рынок. Сглаживаемые плановой экономикой факторы конкурентоспособности в рыночных (точнее – изначальных квазирыночных) условиях рельефно проявили себя, обеспечив «отрыв» небольшой группы регионов-лидеров от всё более периферизирующейся большей части страны. Вдобавок, социально-экономическое развитие стало всё более «сфокусированным» – отдельные центры стали всё быстрее аккумулировать ресурсы всех видов вбирать миграционные потоки. Кроме того, нельзя забывать, что Россия ещё и суровая в природно-климатическом плане страна, что обязательно необходимо учитывать, т.к. недоучёт данного факта не позволяет объективно оценивать тенденции социально-экономического развития и его особенности.

В этом отношении выделяется Дальний Восток России – как по природным особенностям, так и по геополитическим и транспортным. Данная территория в публикации будет рассматриваться в современных границах Дальневосточного федерального округа. Все 11 входящих в его состав субъектов федерации оказались в постсоветское время в крайне сложной ситуации кардинальной перестройки экономической системы, негативных социальных процессов с одновременно нарастающим «отрывом» по экономическому расстоянию от остальной части

страны. В результате произошло сокращение численности населения, трансформация системы расселения, массовое закрытие и перепрофилирование предприятий. По сути – примитивизация социума и экономике, позволившая существовать в сложное время. К 2000м гг. развитие страны в целом начало приобретать позитивную динамику, по-разному проявившую себя на региональном уровне. Усилившиеся постсоветские тенденции пространственного развития отразились и на Дальнем Востоке.

Регионополизация и метрополизация: дефиниция и сущность

Одной из таких тенденций стало то, что главный центр экономической активности – административный центр региона, увеличивается его влияние и доля в экономике. Это следствие усиления поляризационных тенденций, заключающееся в сосредоточении данным центром наиболее прогрессивных и быстрорастущих отраслей.

Иными словами, влияние регионального центра далеко выходит за административную роль, формируя резко доминирующий центр – регионополис. Сущность его требует дополнительных объяснений.

В отечественной науке впервые данный процесс под иным названием – региополизация – выделил Э.Б. Алаев в 1983 г. Он его характеризовал процесс урбанизации, концентрирующийся в региональных центрах [1].

В настоящее время под регионополизацией понимают процесс повышения концентрации экономических мощностей и населения, ведущий к возрастанию социально-экономического потенциала и влияния региональных центров (регионополисов) на процессы экономического, социального, социокультурного, демографического, экологического развития своих регионов [2-4]. Данный процесс является ещё и региональной проекцией процесса метрополизации.

В научной литературе отмечаются следующие трактовки метрополизации:

– «это протекающий в рамках сложившегося политико-экономического механизма регионоформирующий процесс; также и достижение системно значимых миссии, функций, структуры, статуса городом (а, в этой связи, и агломерацией, соответствующим регионом, страной в целом) на фоне (и в конкуренции) с другими узловыми элементами урбанистической сети, что позволяет в совокупности рассматривать её как процесс геопространственного позиционирования (самопозиционирования)» [5, С. 3];

– фактическая, реализуемая «в конкретных геопространственных формах способность одних территорий осуществлять «свою волю» по отношению к другим территориям» [6, С. 21];

– «фаза реструктуризации городов на региональном уровне, а под самими городами теперь подразумеваются Столичные Зоны Роста (англ.: Metropolitan Growth Areas, MEGA), классифицируемые по критериям размера (населения), экономической эффективности, связности и на-укоёмких видов деятельности» [7, С. 115–116];

– «доминирующий город во всей совокупности существенных для него территориально-хозяйственных отношений с собственной периферией» [8, С. 163];

– специфическая форма городской трансформации, сопровождаемая агломерацией экономики и населения в рамках системы городов [9].

Сущность метрополизации – в установлении практики экономического, социально-культурного, политического доминирования ведущего пространственного локалитета региона над подчинённой территорией [10].

Необходимо отметить, что существует два выраженных подхода к пониманию соотношения метрополизации и регионополизации. Согласно первому: метрополизация – это частный случай регионополизации [3], согласно второму: регионополизация – это спроецированный на региональный уровень процесс метрополизации [5]. В данной статье регионополизация понимается как региональная проекция процесса метрополизации.

Несмотря на кажущуюся «теоретизированность» процессов они проявляют себя в реальности. Результатом этого является, то, что региональные центры формируют 30-90 % ВРП,

концентрирующие 15-80 % всех инвестиций, заработная плата на 20–40 % выше среднерегионального значения, ввод жилья на одного жителя, как правило, в 2–3 раза [10].

Показатели региональных центров ДВФО

Для оценки процесса регионополизации применительно к регионам Дальневосточного федерального округа (ДВФО) были использованы специализированные общедоступные статистические сборники «Регионы России. Основные социально-экономические характеристики городов» за 2010, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 гг. [11]. Выбор годов был обусловлен необходимостью отразить постсоветские социально-экономические тенденции.

В качестве показателей были использованы доли (в %) городов-центров применительно к своим регионам – численность населения, инвестиции в основной капитал, наличие основных фондов организаций, ввод жилых домов, оборот розничной торговли. Выбор данных показателей обусловлен несомненной важностью их важной как социально-экономических индикаторов. К тому же, использование этих показателей позволяет наглядно и без трудоёмких расчётов каких-либо агрегированных индексов (которые практически всегда вызывают определённую критику) оценить «вес» регионополиса в своём регионе, его роль и влияние. Результат отображён в табл.

Таблица – Доли региональных центров ДВФО в показателях социально-экономического развития по годам (в %, сост. по [11])

Города	2010	2011	2013	2015	2017	2019
<i>Численность населения</i>						
Анадырь	26,8	26,5	27,8	29,7	31,6	31,5
Биробиджан	42,7	43,7	43,9	44,9	45,4	45,4
Благовещенск	26,5	26,9	27,8	28,5	28,9	29,3
Владивосток	31,5	31,9	32,5	32,8	33,1	33,5
Магадан	65,4	66,1	67,2	67,6	69,2	65,7
Петропавловск-Камчатский	55,8	56,2	57,4	57,2	57,4	57,4
Улан-Удэ	41,6	42,4	43,3	43,8	44,2	44,5
Хабаровск	43	43,6	44,9	45,8	46,5	46,9
Чита	29,3	29,8	30,8	31,7	32,5	33,2
Южно-Сахалинск	36,5	37,6	39,3	39,7	40,6	41,1
Якутск	28,1	29,1	30,8	31,7	32,3	33,2
<i>Инвестиции в основной капитал</i>						
Анадырь	32,8	25,4	58,2	56,4	60,1	60,8
Биробиджан	15,8	8,4	25	51,6	50,6	40,7
Благовещенск	17,2	28,3	20,6	19,3	7,5	4,7
Владивосток	49,4	43,6	65,1	42,7	43,3	47
Магадан	35,1	26,5	13,6	8,8	13,3	15
Петропавловск-Камчатский	84,5	77,2	68,6	56,4	48,1	54,3
Улан-Удэ	48,3	42,6	44,7	41	60,5	65
Хабаровск	29,7	30,4	50,4	53,5	67,4	54,1
Чита	22,2	30,8	22,1	12,9	69,1	47,1
Южно-Сахалинск	9,8	10,2	21	32,4	22,9	20,9
Якутск	24,1	25,4	23,9	25,3	11,5	12,5
<i>Наличие основных фондов организаций</i>						
Анадырь	57,8	64,3	58,6	56,5	59,2	57,3
Биробиджан	59,8	60,8	77,7	58,7	79,1	79,2
Благовещенск	22,7	26,9	32,7	24,1	22,2	25,2
Владивосток	56,3	56,3	70,3	71,7	70,5	67,9
Магадан	67,1	67,6	75,6	78,3	76,1	63,5
Петропавловск-Камчатский	61,6	70,1	78,4	78	81,9	79,1

Улан-Удэ	37	36,6	41,2	46	48,5	50,5
Хабаровск	69	73,9	76,8	75,9	76,2	77,1
Чита	67	81,9	70,8	67,1	56,2	50,8
Южно-Сахалинск	19,4	28,7	24,6	98,2	96,6	93,1
Якутск	40,6	35,7	24,6	23,4	20,8	19,2
<i>Ввод жилых домов</i>						
Анадырь	-	-	-	-	-	-
Биробиджан	83	75,9	47,9	45,1	67,6	39,8
Благовещенск	66,1	65	55,1	58	51,9	41,3
Владивосток	62,4	64,4	57,5	26,9	24,9	41,1
Магадан	73	82,1	39,8	45	70,3	39,8
Петропавловск-Камчатский	70,6	84,3	69,9	57,6	33,3	27,7
Улан-Удэ	54,8	53,4	54,6	58,7	44,4	47,6
Хабаровск	90,2	86,7	65,6	63,5	59,4	67,1
Чита	56,3	57,1	60,5	58,6	43,9	37,9
Южно-Сахалинск	71,1	30,3	39,8	38,1	59,1	59,2
Якутск	54,4	51,2	56	56,3	50,1	63,3
<i>Оборот розничной торговли</i>						
Анадырь	26	24,8	42,7	52,9	51,9	56,1
Биробиджан	70,1	73,8	79,9	81	83,9	83
Благовещенск	11,9	60,5	66,8	71,6	73,5	71,4
Владивосток	52	49,4	43,4	53,4	86,8	81,8
Магадан	82,8	83,7	82,1	86,2	88,3	88,7
Петропавловск-Камчатский	71,2	75,1	80,3	81,2	82,6	83,6
Улан-Удэ	55,8	57,2	56	62,9	67,8	56
Хабаровск	82,7	18,4	81,5	79,1	87,3	77,9
Чита	54,8	50	54	63,5	63,5	57,9
Южно-Сахалинск	76,4	72,3	71,1	7,9	79,3	43,2
Якутск	50,3	47,9	9,6	62,9	59,5	58,4

Анализ по отдельным показателям региональных центров ДВФО позволяет сделать следующие выводы:

- численность населения – доля в показателе у центров медленно, но устойчиво растёт (кроме Магадана, где она практически стабильна), притом этот рост ускорился с 2013 г.;
- инвестиции в основной капитал – тенденции разнонаправлены, наблюдается как кратный рост, так и значительное сокращение показателя;
- наличие основных фондов организаций – для большей части центров характерен рост, притом за исключением Благовещенска и Якутска, величина показателя не менее 50 %;
- ввод жилых домов – доли центров снизились везде (иногда –кратно), кроме Якутска;
- оборот розничной торговли – в основном устойчиво, иногда кратно, доли центров выросли.

В среднем же к настоящему времени, региональный центр данного федерального округа сосредотачивает 20-40 % населения, около 40 % инвестиций, 50-70 % основных фондов организаций, 40-50 % ввода жилых домов, 60-70 % оборота розничной торговли.

Иными словами, дальневосточный регионполис стягивает к себе не только население, но и большую часть экономической активности, стимулируя строительство и розничную торговлю. Происходит выраженное сжатие социально-экономического пространства, когда один локалитет-центр вмещает в себя значительную или большую долю как социума, так и экономики своего региона. Усиление регионополизации выступает следствием сложного процесса пространственной поляризации, проявившейся после распада СССР и ускорившейся в конце 2000-х гг. Под поляризацией следует понимать процесс крайней дифференциации, когда формируются «полюса» с положительными (наиболее благоприятными) и отрицательными

(наименее благоприятными) значениями при одновременном «истончении» средних показателей (это т.н. биполяризация – изменение медианного класса показателей. Биполяризации присущи два аспекта: сокращение медианного класса показателей и сближение данных показателей внутри верхней и нижней групп [12-13]) [14-15]. Причиной же усиления поляризации стали ограниченный набор факторов конкурентоспособности регионов, слабо дифференцированная региональная политика государства, а также догоняющий тип развития страны (при котором региональные разрывы всегда нарастают).

В результате, применительно к ДВФО фактически наблюдается картина формирования мегарегионов (выделяемой к настоящему времени высшей наднагломерационную форму развития урбанизации [16]) – когда относительно небольшие центры сосредотачивают большую часть производства и значительную долю населения. Фактически экономики регионов ДВФО становятся синонимами экономики их региональных центров. При этом формируется очевидное противоречие – формирование таких концентрированных пространственных структур в мире происходит за счёт использования глобальных связей, роста наукоёмких отраслей, новейших производств, сосредоточения креативного класса [16]. На Дальнем Востоке же это происходит не вследствие этого, а за счёт фрагментации пространства, территориальной деградации, пространственного сжатия. Именно это обуславливает доминирование региональных центров, которые не только концентрируют большую часть фондов и привлекают значительные инвестиции, но и выступают как фактически единственные центры торгового обслуживания своих субъектов. Вследствие этого в них фактически замедлилось жилищное строительство – очевидно, что срабатывает определённый «закон насыщения» – когда необходимость такого строительства в условиях депопулирующих регионов невысока, а другие территории вследствие эффекта «низкой базы» наращивают свою долю.

Необходимо отметить, что происходящая в ДВФО регионополизация объективный процесс, бороться с которым, особенно административными методами скорее опасно, чем полезно. Опасность в том, что неудачные управленческие решения по управлению пространственным сжатием ускорят деградации дальневосточных регионов (как примеры – ликвидация «неперспективных» поселений, идея о стягивании населения в создаваемые 20 агломераций и т.д. [17]).

Заключение

В условиях существующей регионализации актуальность приобретают идеи о развитии вне-регионополисных территорий с адресной поддержкой конкурентоспособных производств на них, их рекреационным и селитебном развитии. Любая проблема не только создаёт противоречия, но и формирует новые возможности, которые нельзя упускать.

Литература

1. Алаев Э.Б. Социально-экономическая география: Понятийно-терминологический словарь. – М.: Мысль, 1983. – 350 с.
2. Дружинин А.Г. Метрополии и метрополизация в современной России: концептуальные подходы в политико-географическом контексте / А.Г. Дружинин // Известия РАН. Серия географическая. – 2014. – № 1. – С.19-27.
3. Ридевский Г.В. Три модели сжатия пространства и регионополизация как процесс сжатия пространства на внутристрановом уровне / Г.В. Ридевский // Сжатие социально-экономического пространства: новое в теории регионального развития и практике его государственного регулирования. – М.: Эслан, 2010. – С. 50-60.
4. Ридевский Г.В. Процессы регионополизации и регионополисы российско-белорусского приграничья / Г.В. Ридевский // Социально-экономические, геополитические и социокультурные проблемы развития приграничных районов России: материалы XXXII ежегодной сессии экономико-географической секции МАРС, 2016. – С. 235-250.

5. Дружинин А.Г. Метрополизация как доминантная тенденция территориальной организации общества в постсоветский период: универсальные проявления и южно-российская специфика / А.Г. Дружинин // Географический вестник. – 2009. – № 3 (11). – С. 54–61.
6. Дружинин А.Г. Метрополи и метрополизация в современной России: концептуальные подходы в политико-географическом контексте / А.Г. Дружинин // Известия РАН. Серия географическая. – 2014. – № 1. – С. 19–27.
7. Хомяков Д.А. Метрополизация / Д.А. Хомяков // Архитектура и строительство России. – 2016. – № 4. – С. 115–117.
8. Дружинин А.Г. Межмуниципальные взаимодействия в ареалах метрополизации: факторы, тенденции, проблемы / А.Г. Дружинин, В.Г. Гришин // Terra Economicus. – 2013. – Том 11, № 4, Ч. 2. – С. 162–165.
9. Egedy T., Kovács Z., Kondor A. C. Metropolitan region building and territorial development in Budapest: the role of national policies // International Planning Studies, 22:1. 2017. P. 14–29, DOI: 10.1080/13563475.2016.1219652.
10. Кузин В.Ю. Процесс метрополизации современной России в контексте поляризации / В.Ю. Кузин // Псковский регионологический журнал. – 2019. – № 1(37). – С. 33–45.
11. Регионы России. Основные социально-экономические характеристики городов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13206>, свободный. – (дата обращения: 14.03.2022).
12. Nanak K., Shi L., Xiaobing W., Shanshan W. Social tensions in a growing China / K. Nanak, L. Shi, W. Xiaobing, W. Shanshan // The Manchester School. – 2019. – Vol. 87, no. 2. – P. 228-258. DOI: 10.1111/manc.12250.
13. Roope L., Nico-Zarazua M., Tarp F. How polarized is the global income distribution? / L. Roope, M. Nico-Zarazua, F. Tarp // Economics Letters. – 2018. – Vol. 167. – P. 86-89. DOI: 10.1016/j.econlet.2018.03.013.
14. Кузин В.Ю. Социально-географическая поляризация в системе расселения Воронежской области // Дис. ...к.геогр.н.: 25.00.24 – Санкт-Петербург, 2013. – 228 с.
15. Анохин А.А., Кузин В.Ю. Трансформация современной методологии и трендов исследования поляризации / А.А. Анохин, В.Ю. Кузин // Известия Русского географического общества. – 2021. – Т. 153, № 5. – С. 3-20. DOI 10.31857/S0869607121050025.
16. Смирнягин Л.В. Мегарегионы как новая форма территориальной организации общества / Л.В. Смирнягин // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2011. – № 1. – С. 9-15.
17. Чистобаев А.И. Сюжеты из практики управления развитие территорий в СССР и современной России / А.И. Чистобаев // Социально-экономическая география. Вестник Ассоциации российских географов-обществоведов. – 2018. – № 7. – С. 13–24.

References

1. Alaev E.B. Social'no-ekonomicheskaya geografiya: Ponyatijno-terminologicheskij slovar'. – M.: Mysl', 1983. – 350 s.
2. Druzhinin A.G. Metropolii i metropolizaciya v sovremennoj Rossii: konceptual'nye podhody v politiko-geograficheskom kontekste / A.G. Druzhinin // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. – 2014. – № 1. – S. 19-27.
3. Ridevskij G.V. Tri modeli szhatiya prostranstva i regionopolizaciya kak process szhatiya prostranstva na vnutristranovom urovne / G.V. Ridevskij // Szhatie social'no-ekonomicheskogo prostranstva: novoe v teorii regional'nogo razvitiya i praktike ego gosudarstvennogo regulirovaniya. – M.: Eslan, 2010. – S. 50-60.
4. Ridevskij G.V. Processy regionopolizacii i regionopolisy rossijsko-beloruskogo prigranich'ya / G.V. Ridevskij // Social'no-ekonomicheskie, geopoliticheskie i sociokul'turnye problemy razvitiya prigranichnyh rajonov Rossii: materialy XXXII ezhegodnoj sessii ekonomi'ko-geograficheskoy sekcii MARS, 2016. – S. 235-250.
5. Druzhinin A.G. Metropolizaciya kak dominantnaya tendenciya territorial'noj organizacii obshchestva v postsovetskij period: universal'nye proyavleniya i yuzhno-rossijskaya specifika / A.G. Druzhinin // Geograficheskij vestnik. – 2009. – № 3 (11). – S. 54–61.
6. Druzhinin A.G. Metropolii i metropolizaciya v sovremennoj Rossii: konceptual'nye podhody v politiko-geograficheskom kontekste / A.G. Druzhinin // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. – 2014. – № 1. – S. 19–27.

7. Homyakov D.A. Metropolizatsiya / D.A. Homyakov // *Arhitektura i stroitel'stvo Rossii*. – 2016. – № 4. – S. 115–117.
8. Druzhinin A.G. Mezhmunicipal'nye vzaimodejstviya v arealah metropolizatsii: faktory, tendentsii, problemy / A.G. Druzhinin, V.G. Grishin // *Terra Economicus*. – 2013. – Tom 11, № 4, CH. 2. – S. 162–165.
9. Egedy T., Kovács Z., Kondor A. C. Metropolitan region building and territorial development in Budapest: the role of national policies // *International Planning Studies*, 22:1. 2017. P. 14–29, DOI: 10.1080/13563475.2016.1219652.
10. Kuzin V.YU. Process metropolizatsii sovremennoj Rossii v kontekste polyarizatsii / V.YU. Kuzin // *Pskovskij regionologicheskij zhurnal*. – 2019. – № 1(37). – S. 33–45.
11. Regiony Rossii. Osnovnye social'no-ekonomicheskie harakteristiki gorodov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13206>, svobodnyj. – (data obrashcheniya: 14.03.2022).
12. Nanak K., Shi L., Xiaobing W., Shanshan W. Social tensions in a growing China / K. Nanak, L. Shi, W. Xiaobing, W. Shanshan // *The Manchester School*. – 2019. – Vol. 87, no. 2. – P. 228–258. DOI: 10.1111/man.12250.
13. Roope L., Niso-Zarazua M., Tarp F. How polarized is the global income distribution? / L. Roope, M. Niso-Zarazua, F. Tarp // *Economics Letters*. – 2018. – Vol. 167. – P. 86–89. DOI: 10.1016/j.econlet.2018.03.013.
14. Kuzin V.YU. Social'no-geograficheskaya polyarizatsiya v sisteme rasseleniya Voronezhskoj oblasti // *Dis...k.geogr.n.*: 25.00.24 – Sankt-Peterburg, 2013. – 228 s.
15. Anohin A.A., Kuzin V.YU. Transformatsiya sovremennoj metodologii i trendov issledovaniya polyarizatsii / A.A. Anohin, V.YU. Kuzin // *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. – 2021. – T. 153, № 5. – S. 3–20. DOI 10.31857/S0869607121050025.
16. Smirnyagin L.V. Megaregiony kak novaya forma territorial'noj organizatsii obshchestva / L.V. Smirnyagin // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. – 2011. – № 1. – S. 9–15.
17. CHistobaev A.I. Syuzhety iz praktiki upravleniya razvitiya territorij v SSSR i sovremennoj Rossii / A.I. CHistobaev // *Social'no-ekonomicheskaya geografiya. Vestnik Associatsii rossijskih geografov-obshchestvovedov*. – 2018. – № 7. – S. 13–24.

**ТРЕБОВАНИЯ,
К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ, ПУБЛИКУЕМЫХ
В НАУЧНОМ РЕЦЕНЗИРУЕМОМ
ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК СВФУ ИМЕНИ М.К. АММОСОВА»**

К публикации принимаются научные статьи от авторов из всех регионов России:

- преподавателей вузов,
- докторантов,
- аспирантов,
- магистрантов,
- а также других лиц, занимающихся научными исследованиями.

Требования к содержанию статей

Научные направления:

В серию «Науки о Земле», электронной версии журнала «Вестник СВФУ им. М.К. Аммосова», принимаются статьи, соответствующие Номенклатуре научных специальностей, по которым присуждаются научные степени:

25.00.00	НАУКИ О ЗЕМЛЕ	
25.00.11	Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения	Геолого-минералогические Технические
25.00.14	Технология и техника геологоразведочных работ	Технические
25.00.23	Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов	Географические Геолого-минералогические
25.00.24	Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география	Географические
25.00.36	Геоэкология (по отраслям)	Геолого-минералогические Географические Технические

УДК проставляется в научной библиотеке.

Аннотация: Композиционно построена по принципу IRMAD (Introduction, Methods, Results and Discussion): Актуальность, цели и задачи исследования. Как проводилось исследование, какие методы использовались. Основные выводы, результаты исследования; каковы перспективы исследования, направления дальнейшей работы. Объем аннотации не менее 100 слов. Разделы «Хроника» и «Юбилеи» предоставляются без аннотаций.

Ключевые слова: не менее 10 слов/словосочетаний, они должны быть лаконичными, отражать содержание и специфику рукописи.

Структура статьи:

Введение – постановка рассматриваемого вопроса, краткий обзор научной литературы по теме (ссылки на источники), критика недостатков и преимущества предлагаемого подхода. Обязательна четкая постановка цели работы.

Основная часть работы должна быть озаглавлена, исходя из содержания, разбита на разделы. Разделы должны иметь содержательные названия. Введение, разделы и заключение не номеруются.

Заключение – приводятся основные выводы по содержательной части работы. Следует избегать простого перечисления предоставленного в статье материала.

Литература приводится под заголовком «Литература». Дополнительно дублируется латиницей по системе Библиотеки Конгресса США (LC), сайт для транслитерации: <http://translit.ru>. Все источники перечисляются по порядку упоминания ссылок в тексте. Для периодических изданий необходимо указать фамилию автора, инициалы, название статьи, название журнала, год издания, том, номер или выпуск, начальную и конечную страницу работы.

Сведения об авторе(-ах) на русском и английском языках даются на отдельной странице:

Ф.И.О. полностью, ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), место работы, должность, почтовый адрес с ИНДЕКСОМ (для пересылки авторского экземпляра иногородним), e-mail, контактный тел. (для мобильной связи с редакцией);

Объем статьи: включая иллюстративный материал и «Литературу», до 24 страниц, хроника и юбилеи 1-2 страницы.

Требования к техническому оформлению

- Редактор MS Word, формат А-4, ориентация – книжная, поля – верхн. 2,0 см; нижн. 3,0 см; левое и правое 2,5 см; абзацный отступ – 1,25 см; интервал – полуторный; кегль основного текста – 14, кегль аннотации – 12, шрифт - Times New Roman.

- Сокращения – только общепринятые (и в тексте и таблицах). Все аббревиатуры и сокращения должны быть расшифрованы при первом их употреблении в тексте. Все таблицы должны иметь заголовки и сквозную нумерацию в пределах статьи, обозначаемую арабскими цифрами (например, таблица 1), в тексте ссылки нужно писать сокращенно (табл. 1). Текст таблицы должен быть напечатан через два интервала. В работах биологического цикла в заголовке и в тексте таблицы даются только латинские названия видов, родов и семейств. Комментарий к таблице должен быть размещен непосредственно под таблицей.

- Формулы должны иметь сквозную нумерацию. Номер пишется в конце строки арабскими цифрами в круглых скобках. Между формулами, выделенными в отдельную строку, и текстом, а также между строками формул следует оставлять пробелы не менее 1,5-2 см.

- Иллюстративный материал (графики, карты, схемы, фотографии) именуется рисунком, имеет сквозную порядковую нумерацию арабскими цифрами и пишется сокращенно (например, рис. 1). Допускаются цветные изображения (графики, диаграммы). Размер рисунка – не менее 40x50 мм и не более 120x170 мм. К рисунку прилагается подрисовочный текст, в который содержит указания размерности приведенных на рисунке величин.

- Ссылки в тексте пишутся в виде номера арабской цифрой, взятой в квадратную скобку.

Предоставление статей в редакцию

Сначала предоставляется электронный вариант статьи (рисунки в формате tiff с разрешением не менее 300 dpi) по электронной почте: **vestnik_geo@mail.ru**.

После устранения всех замечаний в редакцию направляется печатный вариант статьи в двух экземплярах. 2-й печатный экземпляр – без указания имени автора (для слепого рецензирования). Адрес редакции: 677027, г.Якутск, ул. Кулаковского, 42, ГУК, кааб. 401,

Если автор – аспирант, или магистрант, то необходим отзыв руководителя.

При положительной рецензии рукописи публикуются в порядке их поступления в течении 3-6 месяцев.

Окончательное решение о публикации статьи принимает редколлегия.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Статьи, присланные без соблюдения изложенных выше требований, не подлежат рассмотрению.

**Вестник Северо-Восточного федерального университета
им. М.К. Аммосова. Vestnik of North – Eastern Federal University.
Серия ”Науки о Земле. Earth Sciences”**

Сетевое научное периодическое издание

2(26) 2022

Технический редактор *А.Н. Егорова*
Компьютерная верстка *Л.М. Винокурова*
Оформление обложки *П.И. Антипин*
Подписано в печать 30.06.2022. Формат 70x108/16.
Дата выхода в свет 30.06.2022.