

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 (30) 2023

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор

А.Н. Николаев, д. б. н.

Заместитель главного редактора, редактор серии «Науки о Земле»

Е.Э. Соловьев, к. г. - м. н., доцент.

Выпускающий редактор

Я.П. Шепелева, к. г. - м. н.

Члены редакционной коллегии:

Верчеба А. А., доктор геолого-минералогических наук, *Гададь С. Ж.-П.*, доктор географических наук, *Григорьевская А. Я.*, доктор географических наук, *Колейка Я. П.*, доктор географических наук, *Мартынов В. Л.*, доктор географических наук, *Михно В. Б.*, доктор географических наук, *Нестеров Ю. А.*, кандидат географических наук, *Никифорова З. С.*, доктор геолого-минералогических наук, *Носонов А. М.*, доктор географических наук, *Округин А. В.*, доктор геолого-минералогических наук, *Полуфунтикова Л. И.*, кандидат геолого-минералогических наук, *Присяжный М. Ю.*, доктор географических наук, *Саввинова А. Н.*, кандидат географических наук, *Семенов Ю. М.*, доктор географических наук, *Тесленок С. А.*, кандидат географических наук, *Толстов А. В.*, доктор геолого-минералогических наук, *Фридовский В. Ю.*, доктор геолого-минералогических наук, *Часовский В. И.*, доктор географических наук.

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

Адрес редакции: 677000, г. Якутск, ул. Петровского, 5, каб.1

Тел./факс: (4112) 40-38-75. e-mail: vestnik_geo@mail.ru. <https://vfuzeml.elpub.ru/jour/index>

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 (30) 2023

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Editor-in-Chief

A.N. Nikovaev, Doctor of Biological Sciences

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

E.E. Solovyov, Candidate of Geological-mineralogical sciences, Associate Professor

Commissioning Editor

Ia. P. Shepeleva, Candidate of Geological-mineralogical sciences Sciences

Members of the Editorial Board of the Series:

Vercheba A. A. Doctor of geological-mineralogical sciences, Gadai S. J.-P. doctor of geographical sciences, Grigorievskaya A. Ya. doctor of geographical sciences, Kolejka J.P. Doctor of Geographical Sciences, V.L. Martynov, Doctor of Geographical Sciences, V. B. Mikhno, Doctor of Geographical Sciences, D. in Geography, Y.A. Nesterov, Ph, Z. S. Nikiforova, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, A. M. Nosonov, Doctor of geographical sciences, Okrugin A. V. doctor of geological-mineralogical sciences, Semifuntikova L. I. Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, A. N. Savvinova, Ph, M. Semenov, Doctor of geographical sciences, S. A. Teslenok, candidate of geographical sciences, Tolstov A. V. doctor of geological-mineralogical sciences, V. Y. Fridovsky, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. Yu. doctor of geological-mineralogical sciences, Chasovsky V. I. Doctor of Geological and Mineralogical Sciences.

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. Petrovskogo, 5, room 1

Telephone/Fax: (4112) 40-38-75. e-mail: vestnik_geo@mail.ru. <https://vfuzeml.elpub.ru/jour/index>
<http://s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/unir/vestnik-svfu/>

© The North-Eastern Federal University, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

- Куляндина А.С.* Анализ пространственного распределения геофизических полей
в очаговой области Илин-Тасского (Абыйского) землетрясения 2013 года 5
- Соловьев Е.Э., Кудрин М.В.* Золотое оруденение центральной части Алдано-Станового щита
в аномалиях геопотенциальных полей..... 13
- Третьякова О.Г., Третьяков М.Ф., Третьякова Н.М.* Интеграция горно-геологической
информационной системы Micromine Origin & Beyond в образовательный процесс
геологоразведочного факультета Северо-Восточного федерального университета..... 27

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

- Данилов Ю.Г., Тахмазов Табриз Мубариз оглы.* О возможности определения
аллометрических показателей деревьев с использованием данных спутникового
дистанционного зондирования 33
- Кортаев В.Н., Поморцев О.А.* Особенности формирования побережий Чукотки
и Корякского нагорья 41
- Поморцев О.А., Кашкаров Е.П., Ловеллус Н.В.* Сверхдлинные дендрошкалы высокогорий
Северной Америки и высоких широт Евразии 56
- Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю.* Оценка процесса восстановления лесов после пожара
с использованием сегментации и кластерного анализа снимков Landsat..... 72
- Тананаев Н.И.* Подбор оптимальной модели климатического реанализа по среднегодовой
температуре воздуха для территории Республики Саха (Якутия)..... 88

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

- Кузин В.Ю.* Оценка пространственной поляризации Дальнего Востока России
в постсоветский период..... 102
- Малых Е.С., Сметанина А.И.* Перспективы развития научно-популярного туризма
в Кировской области..... 114

CONTENT

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERALOGY

- Kulyandina A.S.* An analysis of the spatial distribution of geophysical fields in the source region of the 2013 Ilin-Tas (Aby) earthquake..... 5
- Soloviev E.E., Kudrin M.V.* Gold deposits in the central part of the Aldan-Stanovoy shield in anomalies of geopotential fields..... 13
- Tretyakova O.G., Tretyakov M.F., Tretyakova N.M.* Integrating MGIS Micromine Origin & Beyond into the educational process at the Geological Prospecting Faculty of the M. K. Ammosov North-Eastern Federal University 27

PHYSICAL GEOGRAPHY AND BIOGEOGRAPHY, SOIL GEOGRAPHY AND LANDSCAPE GEOCHEMISTRY

- Danilov Y. G., Tahmazov Tabriz Mubariz oglu* On the possibility of determining allometric indicators of trees using satellite remote sensing data..... 33
- Korotaev V.N., Pomortsev O.A.* Features of the formation of the coasts of Chukotka and the Koryak highlands 41
- Pomortsev O.A., Kashkarov E.P., Lovelius N.V.* Ultra-long dendroscales of the high latitudes in North America and the high latitudes in Eurasia 56
- Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu.* An assessment of forest restoration after fire using segmentation and cluster analysis of Landsat images..... 72
- Tananaev N. I.* Selection of the best-performing climate reanalysis model for the Sakha (Yakutia) Republic, based on mean annual air temperature 88

ECONOMIC, SOCIAL, POLITICAL, AND RECREATIONAL GEOGRAPHY

- Kuzin V.Yu.* An evaluation of the Russian Far East spatial polarization in the post-Soviet period 102
- Malykh E.S., Smetanina A.I.* The development prospects of popular science tourism in Kirov Oblast.....114

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 550.348. (571.56)

DOI 10.25587/SVFU.2023.30.2.001

А. С. Куляндина

Северо-восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия
Якутский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»,
г. Якутск, Россия
e-mail: Albineku28@gmail.com

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ОЧАГОВОЙ ОБЛАСТИ ИЛИН-ТАССКОГО (АБЫЙСКОГО) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2013 ГОДА

Аннотация. В статье проводится анализ сильного Илин-Тасского землетрясения, произошедшего в системе хребта Черского на территории Республики Саха (Якутия) в 2013 году. Горная система хребта Черского приурочена к сейсмотектонической зоне Черского, входящей в Арктико-Азиатский сейсмический пояс, разделяющий Евразийскую и Североамериканскую литосферные плиты в Северо-Восточной Азии. Интенсивность землетрясения в эпицентре составила 9 баллов. В качестве материала для уточнения структурно-тектонических особенностей изучаемой территории и их взаимосвязи с сейсмичностью были использованы геофизические поля. Привлечение данных пространственного распределения аномалий магнитных и гравитационных полей, дало возможность детализировать параметры положения Илин-Тасского разлома, где возникло эпицентр Илин-Тасского землетрясения. Данный разлом трассируется между реками Индигирка и Колыма вдоль границы сочленения Момского хребта с Индигиро-Зырянской впадиной, и прослеживается по градиентным зонам перехода от отрицательных к положительным значениям ΔT_a и Δg . Главный сейсмический толчок приурочен к сгущению изоаномалий Δg , образующих гравитационную ступень, в пределах которой значения силы тяжести уменьшаются с юга на север. Эпицентрального поля данного землетрясения с афтершоками захватывает западный склон кряжа Андрей-Тас (северо-западный фланг Момского хребта). Проведен качественный анализ геофизических полей в эпицентральной области землетрясения. В статье приводятся материалы инструментальных и макросейсмических данных, фокальный механизм и сейсмотектоническая обстановка очаговой зоны. Данные, полученные в результате изучения последствий Илин-Тасского землетрясения, позволяет детально раскрыть местную сейсмическую активность и уточнить степень сейсмоопасности северо-востока Якутии.

Ключевые слова: Система хребта Черского, энергетический класс, магнитуда, магнитное поле, поле силы тяжести, макросейсмические сведения, афтершоки, эпицентр землетрясения.

A. S. Kulyandina

M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia
 Yakutsk Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia
 e-mail: Albineku28@gmail.com

AN ANALYSIS OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF GEOPHYSICAL FIELDS IN THE SOURCE REGION OF THE 2013 ILIN-TAS (ABY) EARTHQUAKE

Abstract. This article analyzes the powerful Ilin-Tas earthquake that occurred in the Chersky Range system in the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2013. The mountain system of the Chersky Range system is confined to the Chersky seismotectonic zone, which is part of the Arctic-Asian seismic belt separating the Eurasian and North American lithospheric plates in Northeast Asia. The earthquake magnitude at the epicentre was 9.0. Geophysical fields were used as a material to clarify the structural-tectonic features of the study area and their relationship with seismicity. Involving the data on spatial distribution of anomalies of magnetic and gravity fields made it possible to detail the parameters of the position of the Ilin-Tas fault, where the epicentre of the Ilin-Tas earthquake originated. This fault traces between the Indigirka and Kolyma rivers along the border of the junction of the Moma Range with the Indigiro-Zyryansk depression, and is traced by gradient transition zones from negative to positive values of ΔT_a and Δg . The main seismic shock is confined to thickening of Δg isoanomalies, forming a gravitational step, within which gravity values decrease from south to north. The epicentral field of this earthquake with aftershocks captures the western slope of the Andrey-Tas Range (northwestern flank of the Moma Range). A qualitative analysis of the geophysical fields in the epicentral region of the earthquake is carried out. Materials of instrumental and macroseismic data, focal mechanism and seismotectonic setting of the focal zone are given in the article. The data obtained as a result of studying the Ilin-Tas earthquake consequences allows to reveal local seismic activity in details and specify seismodanger degree of north-east Yakutia.

Keywords: Chersky Range System, energy class, magnitude, magnetic field, gravity field, macroseismic data, aftershocks, earthquake epicenter.

Введение

Одним из значительных землетрясений за время существования сети инструментальных наблюдений (с 1963) является Илин-Тасское (Абыйское) землетрясение. Оно произошло 14 февраля 2013 г. в 13^h13^m с $M_w=6.7$ на глубине 14 км в районе хребта Черского. Интенсивность удара в эпицентре достигла 9 баллов по шкале MSK-64. После главного толчка в течение года последовала серия повторных ударов, более четырёх тысяч событий, включая слабые проявления [1].

Эпицентральная область Илин-Тасского (Абыйского) землетрясения приурочена к северо-западному окончанию крупной тектонической структуры (Момский хребет и кряж Андрей-Тас), сложенной морскими отложениями верхней юры и осадочно-континентальными толщами нижнего мела, интенсивно дислоцированными в систему линейных складок северо-западного простирания. Примыкающая к ней с северо-востока Индигиро-Зырянская впадина представлена меловыми и кайнозойскими отложениями, которые далее к северу сменяются осадочными отложениями Яно-Индигирской низменности (рис.1). Тектоническое строение взаимоотношений этих двух крупных структурных элементов в неотектоническое время определяется горизонтальным кораблением Момского хребта и формированием протяжённого сводового поднятия, протягивающегося от р. Индигирки до р. Колымы, которое своим северо-восточным флангом надвинуто на край Индигиро-Зырянской впадины [2]. Это также видно на карте современных вертикальных тектонических движений (2–4 мм/год), рис. 2 [3].

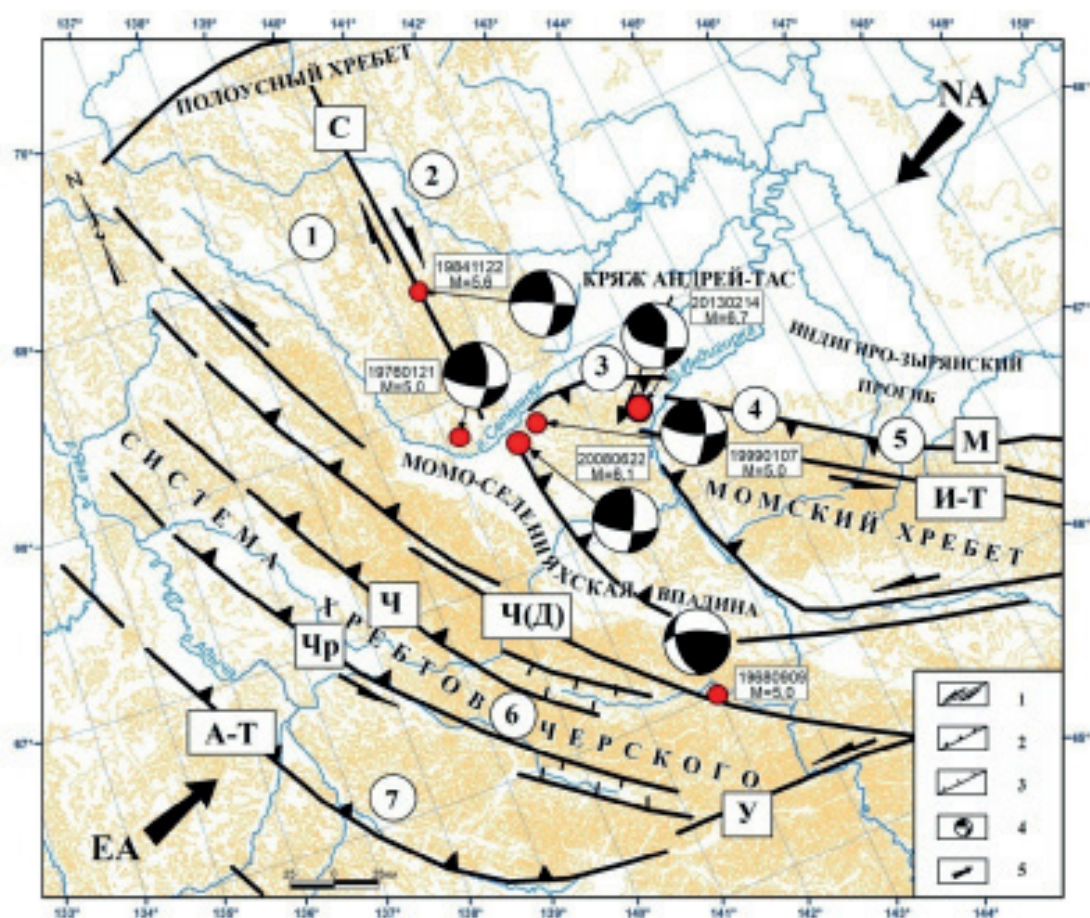


Рис. 1. Карта эпицентров сильных землетрясений территории кряжа Андрей-Тас и прилегающей Момо-Селенняхской впадины за 1968 – 2013 гг.

1–3 – разломы: 1 – сдвиги, 2 – надвиги, 3 – сбросы, 4 – механизмы очагов сильных землетрясений с указанием даты их возникновения и магнитуды, белым цветом обозначены области разряжения, 5 – направление движения плит [4]. NA и EA – Североамериканская и Евразийская литосферные плиты. Места позднекайнозойских взбрососдвиговых деформаций обозначены цифрами в кругах (1 – Верхнеселенняхская, 2 – Инач, 3 – Сисиктех, Никондя, 4 – Кыллах, 5 – Мятись, Элгандя, 6 – Чаркынская, 7 – Ченкеленьинская). Буквами обозначены названия главных разломов: А-Т – Адыча-Тарынский, Чр – Чаркынский, Ч – Чемалгинский, Ч(Д) – Чибагалахский (Догдинский), С – Селенняхский, У – Улахан, М – Мятисский, И – Т – Илин-Тасский [5, с дополнением]

Fig. 1. Map of epicenters of strong earthquakes in the territory of the Andrey-Tas ridge and the adjacent Momo-Selennyakh depression for 1968-2013

1-3– faults: 1– shifts, 2– thrusts, 3– discharges; 4– mechanisms of foci of strong earthquakes, indicating the date of their occurrence and magnitude, the areas of discharge are indicated in white; 5 – the direction of plate movement [4]. NA and EA are the North American and Eurasian lithospheric plates. The places of Late Cenozoic thrust deformations are indicated by numbers in circles (1 – Verkhneselennyakhskaya, 2 – Inach, 3 – Sisikteh, Nikondya, 4 – Kyllakh, 5 – Myash, Elgandya, 6 – Charkynskaya, 7 – Chenkeleninskaya). The letters are the names of the main fractures: А-Т – Adycha-Tarynsky, Cr – Charkynsky, Ч – Chemalginsky, Ч (D) – Chibagalakhsky (Dogdinsky), S – Selennyakhsky, U – Ulakhany, M – Myatitsky, I-T – Ilin-Tass [5, with an addendum]

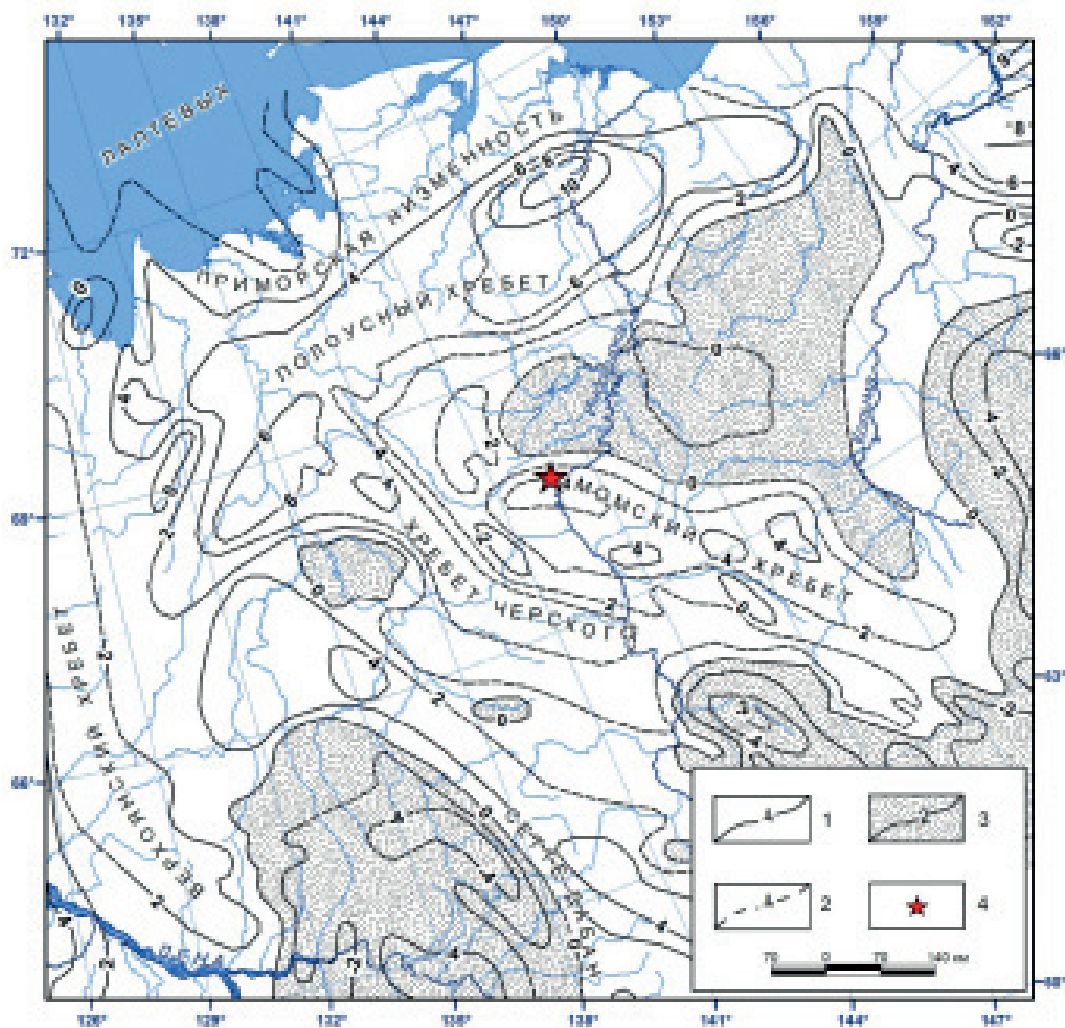


Рис. 2. Карта скоростей современных вертикальных тектонических движений (мм/год)

1 – поднятие, 2 – предполагаемые, 3 – опускание, 4 – инструментальный эпицентр Илин-Тасского землетрясения [3]

Fig. 2. Velocity map of modern vertical tectonic movements (mm/year)

1 – raising, 2 – presumed, 3 – lowering, 4 – instrumental epicenter of the Ilin-Tass earthquake [3]

Основное простирание генеральных разломов Илин-Тасский и Улахан соответствует направлению северо-запад – юго-восток. Илин-Тасское землетрясение произошло в системе локальных разломов, ориентированных с северо-востока на юго-запад, перпендикулярной расположению генеральных тектонических нарушений. Диаграммы фокальных механизмов в эпицентральной зоне указывают на преобладание подвижек типа взбросов, надвигов и сдвигов (рис. 1), содействующих подыманию данного района.

Приведённые макросейсмические сведения Илин-Тасского землетрясения подтверждают, что местные структуры, как и изосейсты вытянуты в направлении юго-запад – северо-восток (рис. 3). Данное землетрясение ощущалось в восьми арктических районах (Абыйском, Верхоянском, Оймяконском, Момском, Верхнеколымском и др.) республики, и своевременно собрана информация о последствиях толчка. На основе макросейсмических данных построена карта изосейст Илин-Тасского (Абыйского) землетрясения (рис. 3). Сотрясение

почувствовали в 24 населённых пунктах, расположенных в междуречье Яны–Индикирки–Колымы. Землетрясение ощутили на территории почти 500 тыс. кв.км. с интенсивностью от 2 до 7 баллов.

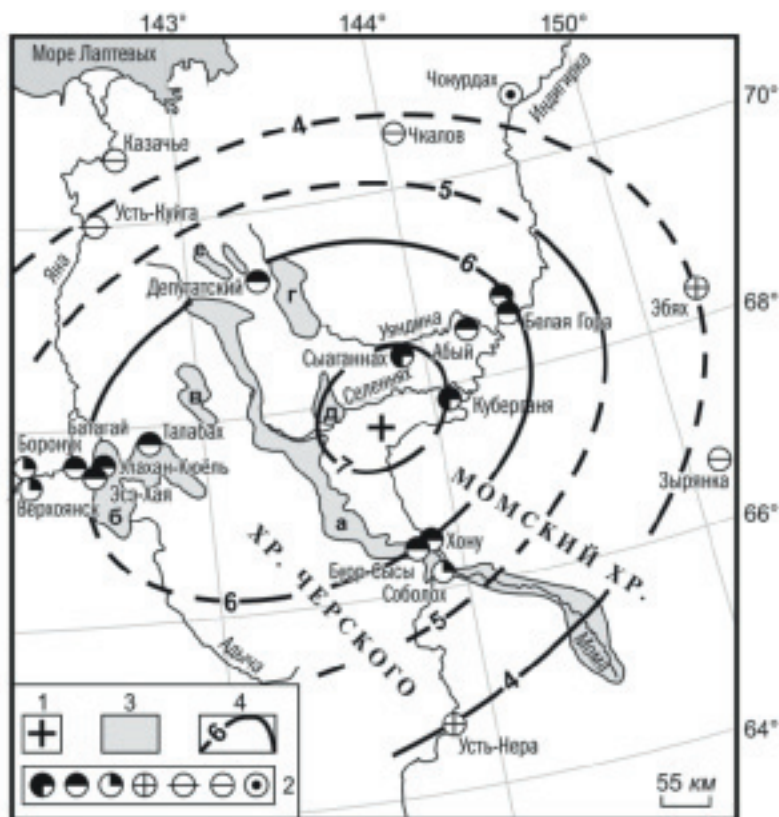


Рис. 3. Карта изосейст Илин-Тасского землетрясения 14 февраля 2013 г. с $K_p=15.2$, $M_w=6.7$. 1 – инструментальный эпицентр; 2 – интенсивность сотрясений $I=7, 6, 5, 4, 3-4, 3$ и 2 балла; 3 – кайнозойские впадины: Момо-Селенняхская (а), Туостакская (б), Неннелинская (в), Уяндинская (г), Томмотская (д), Иргичанская (е); 4 – изосейсты (сплошные линии – уверенные, штриховые – предполагаемые) [1]

Fig. 3. Map of the isoseist of the Ilyint earthquake on February 14, 2013 with $K_p=15.2$, $M_w=6.7$. 1 – instrumental epicenter; 2 – intensity of concussions $I=7, 6, 5, 4, 3-4, 3$ and 2 points; 3 – Cenozoic depressions: Momo-Selennyakhskaya (a), Tuostakhskaya (b), Nennelinskaya (c), Uyandinskaya (d), Tommotskaya (d), Irgichanskaya (e); 4 – isoseists (solid lines – confident, dashed – assumed) [1]

Анализ пространственного распределения геофизических полей

Методика анализа пространственного распределения геофизических полей основывалась на их априорной связи с геологическим строением района [6].

Как показано на рисунке 4, Илин-Тасское землетрясение приурочено к ступени изогипс, образующих гравитационную ступень, в пределах которой значения силы тяжести уменьшаются с юга на север. Всё эпицентральное поле с афтершоками захватывает восточный склон кряжа Андрей-Тас (Рис.1). Гравитационное поле района представляет собой систему чередующихся линейных положительных и отрицательных аномалий и имеет блоковое строение. Андрей-Тасский блок проявляется в виде гравитационного максимума интенсивностью более 48 мГал. В данной местности максимум Δg обусловлен воздыманием более плотных древних пород вверх по сместителю лобовой части шарьяжа, и выделяется как Илинтасская положительная аномальная зона. Зоны локальных минимумов соответствуют припущенному блоку

фундамента, и структуре облекания в низах осадочного чехла и представлены Селенняхской отрицательной аномальной зоной. Выделенные аномальные зоны отделены друг от друга Илин-Тасским разломом, куда примыкает главный сейсмический удар. Илин-Тасский разлом четко выделяется гравитационным градиентом с субширотным простиранием, к западу меняет простирание на субмеридиональное. Изоаномалии гравитационного поля имеют вытянутые формы в северо-западном направлении и распределяются неравномерно.

Илин – Тасское землетрясение и его афтершоки прослеживаются по градиентным зонам перехода от отрицательных к положительным значениям ΔT_a и Δg . Магнитное поле дифференцировано и представлено отрицательными (до -150 мГал) и положительными (до 300 мГал) аномалиями. Смена характера и уровня магнитного поля данной территории показывает блоковое строение местности. Межблочная зона соответствует положению разделяющего тектонического разлома. На основании того, что большинство известных крупных разрывов и трещин в земной коре имеют длину свыше 150 – 200 км, Илин-Тасское разрывное нарушение относится к глубинным разломам. Его протяженность по магнитным аномалиям более 500 км.

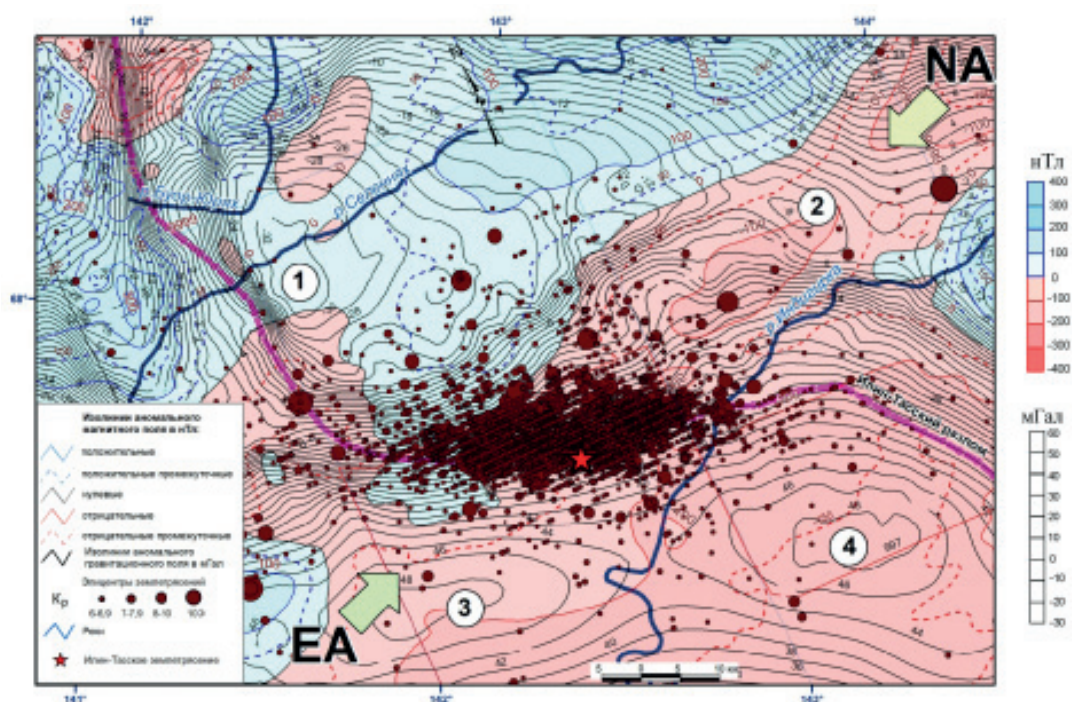


Рис. 4. Фрагмент карты распределения геофизических полей на территории исследования

Цифрами обозначены блоки: 1, 2 – гравитационные минимумы Селенняхской отрицательной аномальной зоны, 3, 4 – гравитационные максимумы Илинтасской положительной аномальной зоны.

Fig. 4. Fragment of the map of the distribution of geophysical fields in the study area

The numbers indicate the blocks: 1, 2 – gravitational minima of the Selennyakh negative anomalous zone, 3, 4 – gravitational maxima of the Ilyintass positive anomalous zone.

Закключение

Привлечение данных цифровой карты аномалий геофизических полей, дало возможность уточнить форму и положение Илин-Тасского разлома, где возник эпицентр Илин-Тасского землетрясения. Удалось детально проследить как данный разлом, отделяющий Индиго-Зырянский прогиб от возвышенностей Момского хребта и кряжа Андрей-Тас, отражается в геопотенциальных полях.

Анализ особенностей распределения геофизических полей в очаговой области Илин-Тасского (Абыйского) землетрясения позволил детализировать блоковое строение района исследования и позицию глубинного разлома, который ранее рассматривался только по данным геолого-структурных наблюдений без учёта внутреннего строения земной коры. По характеру распространения гравитационного поля, по всей вероятности, максимумы силы тяжести определены структурой рельефа и строением кристаллического фундамента. По рисунку изолиний поля силы тяжести на территории исследования выделяются 4 блока. Равным образом, смена доминирующего направления локальных магнитных аномалий подтвердили блоковое строение этого района.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>)

Литература

1. Шибаев, С.В. Козьмин Б.М., Имаева Л.П., Имаев В.С., Петров А.Ф., Старкова Н.Н. Илин-Тасское (Абыйское) землетрясение 14 февраля 2013 г. с $M_w=6.7$ (северо-восток Якутии) / С.В. Шибаев, Б.М. Козьмин, Л.П. Имаева, В.С. Имаев, А.Ф. Петров, Н.Н. Старкова. – Текст: непосредственный // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 92–102. DOI:10.35540/2686-7907.2020.1.09. – EDN: PXLPLM.
2. Имаева, Л.П. Сеймотектоническая активизация новейших структур восточного сектора Сибирского кратона: монография / Л.П. Имаева. – Пенза: Научно-издательский центр «Социосфера», 2022. – 370 с. – Текст: непосредственный.
3. Бочаров, Г.В. Карта современных движений территории Якутской АССР / Г.В. Бочаров, Г.С. Гусев, Л.В. Есикова, В.Б. Спектор. – Текст: непосредственный // Геотектоника. – 1982. – № 3. – С. 60–63.
4. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / под общей редакцией Л.М. Парфенова, М.И. Кузьмина. – Москва: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 571 с. – Текст: непосредственный.
5. Джурик, В. И. Сейсмогеологические, сейсмологические и инженерно-сейсмологические исследования лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЗК со РАН / В. И. Джурик. – Текст: непосредственный // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5. – № 1. – С. 135–157.
6. Трофименко, С.В. Структура и динамика геофизических полей и сейсмических процессов в блоковой модели земной коры: 25.00.10: диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук: защищена 24.02.11 / Трофименко Сергей Владимирович – Томск: Томский политехнический университет, 2011. – 223 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Shibaev, S.V. Koz'min B.M., Imaeva L.P., Imaev V.S., Petrov A.F., Starkova N.N. Ilin-Tasskoe (Abyjskoe) zemletrjasenie 14 fevralja 2013 g. s $M_w=6.7$ (severo-vostok Jakutii) / S.V. Shibaev, B.M. Koz'min, L.P. Imaeva, V.S. Imaev, A.F. Petrov, N.N. Starkova. – Tekst: neposredstvennyj // Rossijskij sejsmologicheskij zhurnal. – 2020. – Т. 2, № 1. – S. 92–102. DOI:10.35540/2686-7907.2020.1.09. – EDN: PXLPLM.
2. Imaeva, L.P. Sejsmotektonicheskaja aktivizacija novejsih struktur vostochnogo sektora Sibirskogo kratona: monografija / L.P. Imaeva. – Penza: Nauchno-izdatel'skij centr «Sociosfera», 2022. – 370 s. – Tekst: neposredstvennyj.
3. Bocharov, G.V. Karta sovremennyh dvizhenij territorii Jakutskoj ASSR / G.V. Bocharov, G.S.Gusev, L.V. Esikova, V.B. Spector. – Tekst: neposredstvennyj // Geotektonika. – 1982. – № 3. – S. 60–63.

4. Tektonika, geodinamika i metallogenija territorii Respubliki Saha (Jakutija) / pod obshhej redakciej L.M. Parfenova, M.I. Kuz'mina. – Moskva: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. – 571 s. – Tekst: neposredstvennyj.
5. Dzhurik, V. I. Sejsmogeologicheskie, seismologicheskie i inzhenerno-seismologicheskie issledovanija laboratorii inzhenernoj seismologii i seismogeologii IZK so RAN / V. I. Dzhurik. – Tekst: neposredstvennyj // Geodinamika i tektonofizika. – 2014. – T. 5. – № 1. – S. 135-157.
6. Trofimenko, S.V. Struktura i dinamika geofizicheskikh polej i seismicheskikh processov v blokovej modeli zemnoj kory: 25.00.10: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora geologo-mineralogicheskikh nauk: zashhishhena 24.02.11 / Trofimenko Sergej Vladimirovich – Tomsk: Tomskij politehnicheskij universitet, 2011. – 223 s. – Tekst: neposredstvennyj.

Сведения об авторах

КУЛЯНДИНА Альбина Семеновна – аспирант 2-го года обучения СВФУ Геологоразведочный факультет Кафедра Геофизические методы поисков и разведки МПИ, ведущий инженер-геофизик Якутского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба» РАН, e-mail: albineku28@gmail.com

KULYANDINA Albina Semenovna – 2nd year postgraduate student, Department of Geological Exploration Geophysical Methods of Prospecting and Exploration, NEFU; Leading Geophysical Engineer, Yakutsk Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (Yakutsk Branch of GS RAS), e-mail: albineku28@gmail.com

Е. Э. Соловьев¹, М. В. Кудрин²

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия

²Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Россия

e-mail: solov.evg@yandex.ru

e-mail.ru: kudrinmv@mail.ru

ЗОЛОТОЕ ОРУДЕНЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ АЛДАНО-СТАНОВОГО ЩИТА В АНОМАЛИЯХ ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

Аннотация. Проведен анализ потенциальных геофизических полей центральной части Алдано-Станового щита. На основе современной автоматизированной программы KOSCAD 3D проведены следующие трансформации гравитационных и магнитных аномалий – вычисление статистических и градиентных характеристик, двумерная энергетическая адаптивная фильтрация, расчет коэффициента парной корреляции данных. По результатам обработки и интерпретации геолого-геофизических материалов уточнено блоковое строение исследуемой территории и выделены геофизические критерии локализации золотого оруденения центральной части Алдано-Станового щита.

Ключевые слова: Алдано-Становой щит, гравитационное и магнитное поля, геофизические аномалии, трансформации, золотое оруденение.

E. E. Soloviev¹, M. V. Kudrin²

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

² Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB, RAS, Yakutsk, Russia

e-mail: solov.evg@yandex.ru

e-mail.ru: kudrinmv@mail.ru

GOLD DEPOSITS IN THE CENTRAL PART OF THE ALDAN-STANOVY SHIELD IN ANOMALIES OF GEOPOTENTIAL FIELDS

Abstract. The analysis of potential geophysical fields of the central part of the Aldan-Stanovoy shield was carried out. Based on the modern automated program KOSCAD 3D, the following transformations of gravity and magnetic anomalies were carried out: a calculation of statistical and gradient characteristics, two-dimensional energy adaptive filtering, and a calculation of the data correlation coefficient. Based on the results of processing and interpretation of geological and geophysical materials, the block structure of the study area was clarified and geophysical criteria for the localization of gold mineralization in the central part of the Aldan-Stanovoy shield were identified.

Keywords: Aldan-Stanovoy shield, gravitational and magnetic fields, geophysical anomalies, transformations, gold mineralization.

Введение

Центральная часть Алдано-Станового щита характеризуется высокой золотоносностью. Здесь открыты различные по генезису и масштабам многочисленные золоторудные месторождения и проявления. За всю многолетнюю историю освоения в регионе извлечено более 2000 т благородного металла [1]. В настоящее время, наблюдается существенное истощение разведанных запасов россыпного и рудного золота. В связи с этим, актуальными становятся проблемы воспроизводства минерально-сырьевой базы Алдано-Станового щита, в том числе, выявление новых перспективных площадей путем переинтерпретации имеющихся геолого-геофизических данных.

При изучении закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых важное место занимает анализ геофизической информации. На основе интерпретации геофизических

аномалий выделены и локализованы рудоносные и потенциально рудоносные площади разного ранга Верхояно-Колымской складчатой области, Забайкалья, Дальнего Востока [2, 3, 4, 5].

Цель данной работы – на основе комплексной интерпретации грави – и магнитных аномалий и их трансформант установить геофизические критерии локализации золотого оруденения центральной части Алдано-Станового щита, на примере Верхнетимптонского и Верхнегонамского рудных районов.

Исследуемая территория расположена в зоне влияния Становой зоны разломов (швов), разделяющего Алданский щит и Становую складчатую область. По современным представлениям тектонического анализа, регион находится на границе Тындинского (TN) и Нимнырского (ANM) террейнов, которая представлена Амгинской (am) и Коларской (kl) зонами тектонического меланжа (рис. 1). Здесь выделяются древние структуры кристаллического фундамента (южная часть Алданского щита, северное окончание Становой складчатой области), осложнённые структурами этапа глыбовых деформаций среднего протерозоя (?) и мезозоя и платформенный чехол. Интрузивные, ультраметаморфические и субвулканические образования широко развиты в районе. По составу они варьируют от ультраосновных до кислых со многими переходными разностями.

Значительную роль в геологическом строении описываемой территории играют разрывные нарушения. По направлениям разломы подразделяются на три основные системы: северо-западные, субширотные, северо-восточные. Они сопровождаются узкими зонами катаклаза, глиной трения, оперяющей мелкой трещиноватостью, хлоритизацией, окварцеванием. Наиболее древними по времени заложения предполагаются северо-западные разломы, направления которых совпадают с направлением древних архейских структур.

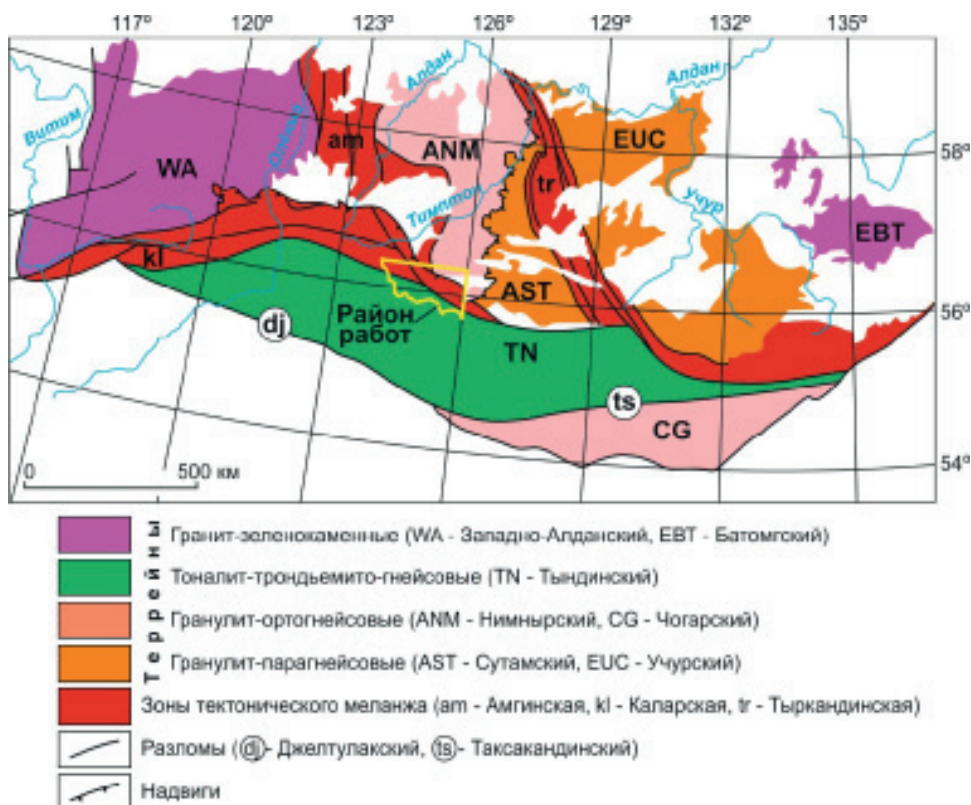


Рис. 1. Схема террейнов Алдано-Станового щита по [6] и расположение площади исследований Батомгский (EBT) и Учурский (EUC) террейны образуют Восточно-Алданский супертеррейн, Нимнырский (ANM) и Сутамский (AST) террейны – Центрально-Алданский супертеррейн

Fig. 1. The scheme of the Aldan-Stanovoy shield terranes according to [6] and the location of the research area. The Batomg (EBT) and Uchur (EUC) terranes form the East Aldan Superterrane, the Nimnyr (ANM) and Sutam (AST) terranes form the Central Aldan Superterrane.

В пределах изучаемой площади известны Верхнегонамский и Верхнетимптонский рудные районы, которые отнесены к Амгино-Становой металлогенической зоне [6]. Протяженность Амгино-Становой металлогенической зоны составляет не менее 700 км. Северный её отрезок имеет почти субмеридиональное простирание, а южный – субширотное. Преобладающими типами минерализации в Верхнетимптонском рудном районе являются золото-кварцевый мало-сульфидный и золото-серебряный (полисульфидно-кварцевый) в березитах, наложенных на зоны диафторитов [7]. Отмечается, что для локализации рудного золота важное значение имеют узлы и зоны позднемеловой активизации (юра-мел) с мезозойским магматизмом, наложенные на древние (поздний архей-протерозой) зоны бластомилонитов Северо-Станового краевого шва.

Материалы и методы исследований

В работе использованы схемы оцифрованных магнитных и гравитационных (в условном уровне) аномалий различных масштабов [8]. Увязка гравитационных аномалий выполнена по гравиметрической карте в редукции Буге ($\sigma = 2,67 \text{ г/см}^3$) масштаба 1:5 000 000 [9].

Выявление закономерностей размещения золотого оруденения исследуемой территории в геофизических аномалиях осуществлялось на основе трансформации геопотенциальных полей. Основной целью трансформации геофизических полей является наиболее полное разделение исходного наблюдаемого поля на составляющие, каждая из которых отвечает объектам разной геологической природы, залегающих на разной глубине или отличающихся другими признаками. Любые трансформации гравитационных и магнитных аномалий опираются на некоторые априорные геологические предпосылки: интервалы глубин ожидаемых объектов, размеры аномалий, их градиенты и т.д. [10, 11].

В настоящее время существует множество различных методов трансформации аномалий [12, 13]. Большинство из них основано на известном соответствии порядка геологических структур и отвечающих им аномалий: чем крупнее аномалеобразующий объект и чем глубже он залегает, тем более обширные по площади и малые по градиенту аномалии он создает, и наоборот, чем меньше размеры объекта и глубина его залегания, тем ограниченнее аномалия по площади и резче его градиенты.

Трансформации гравитационного и магнитного полей выполнены в автоматизированной программе KOSCAD 3D, предназначенного для обработки геолого-геофизических данных на основе статистического и спектрально-корреляционного анализов. Выходные данные формировались в программе Surfer 15.

В начале исследований, в базу данных введен комплекс цифровой геоинформации, измеренной в точках двумерной (X, Y, F) нерегулярной сети наблюдений. Ввод данных производился с помощью модуля «Ввод данных из системы Surfer», предварительно подготовленных в цифровом виде. Далее проводилась интерполяция регулярных сетей. Для повышения детальности, точки измерений были учащены до размеров 100×100. Следующим этапом была послойная экстраполяция сети в направлении профилей и вкрест их простирания. Экстраполяция проводится для исключения краевых эффектов, возникающих при фильтрации геопотенциальных полей и пересчете их статистических характеристик. Качественные результаты получаются, если число экстраполируемых точек слева, справа, снизу и сверху не превышает 5-15 % от общего числа пикетов или профилей сети. В данном случае, размер площади был экстраполирован на 25 точек со всех сторон поля.

После проведения соответствующих вычислений, перечисленными программами, полученные результирующие карты, были приведены к исходным размерам посредством модуля «Фрагментация сети».

В ходе исследований по этапу вероятностно-статистического анализа геофизических данных проведена следующая обработка геофизических полей:

1. Расчет двумерной автокорреляционной функции для выбора оптимального размера скользящего окна.
2. Оценка статистических характеристик геопотенциальных полей в окне «живой» формы.
3. Оценка градиентных характеристик геопотенциальных полей.
4. Двумерная адаптивная энергетическая фильтрация полей с выделением локальной и региональной составляющих в фиксированном окне.
5. Расчет коэффициента корреляции гравитационного и магнитного полей в скользящем окне.

Расчет двумерной автокорреляционной функции

Двумерная автокорреляционная функция (ДАКФ) используется для описания корреляционных свойств двумерных геофизических полей. Данная функция вычисляется по формуле [14]:

$$D(k, m) = \frac{1}{(P-k) \cdot (N-m)} \cdot \sum_{j=1}^{P-k} \sum_{i=1}^{N-m} [f(j, i) \cdot f(j+k, i+m)]$$

где $f(i, j)$ – значение поля на j -ом профиле в i -точке; m – смещение по пикетам; k – смещение по профилям; N – число точек на профиле; P – число профилей.

ДАКФ для гравитационного и магнитного полей рассчитана с целью определения основного простирания аномалий изучаемых полей, учета изменения корреляционных свойств исходных данных по различным направлениям и обоснованного выбора размеров и наклона окна фильтрации для двумерных линейных фильтров (рис. 2).

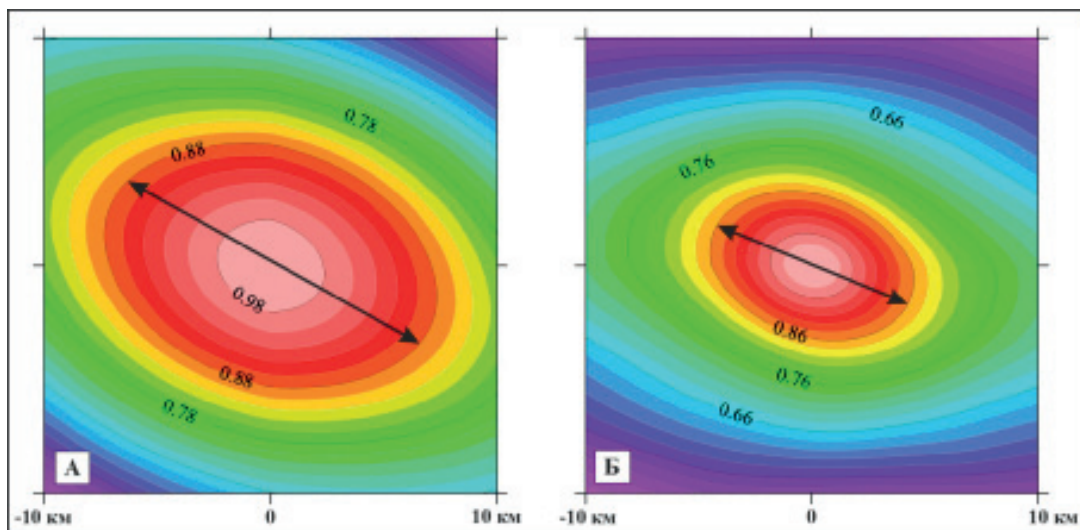


Рис. 2. Двумерная автокорреляционная функция значений гравитационного (А) и магнитного (Б) полей

Fig. 2. Two-dimensional autocorrelation function of values of gravitational (A) and magnetic (B) fields

Анализ двумерной автокорреляционной функции показал, что энергоемкие гравитационные аномалии исследуемой территории характеризуются вытянутой формой размерностью 14×10 км и северо-западным простиранием (рис. 2А). Оптимальные размеры статистического «окна» для проведения трансформаций по значимым величинам ДАКФ (0,8 – 1) составили 71×51 элементарных точек и наклон окна фильтрации (-2). Магнитные аномалии имеют размеры 11×9 км и ориентированы в северо-западном направлении. Размеры «окна» составили 56×46 элементарных ячеек, наклон окна – (-2) (рис. 2 Б).

Оценка статистических характеристик геопотенциальных полей

Оценка статистических характеристик геополей производилась с помощью блока «Статистика» автоматизированной системы KOSCAD 3D. Путем процедуры расчета статистических характеристик геополей можно получить поля среднего, дисперсии, асимметрии, эксцесса, моды, медианы и энтропии изучаемого геопотенциального поля. Анализ их особенностей позволяет успешно решать задачи геологического картирования и районирования, а также эффективно выделять аномальные признаки изучаемого массива данных [15].

Оценка градиентных характеристик геопотенциальных полей

Определение статистических оценок градиентов геофизических полей позволяет детализировать особенности поля и подчеркнуть границы аномальных объектов. При анализе и интерпретации результатов данной трансформации необходимо учитывать следующую информацию:

- границы аномальных объектов отмечаются экстремумами в полях градиентов вдоль осей и максимумами в поле полного градиента;
- поле направления полного градиента позволяет оценить простираание аномалий в каждой точке исходной сети наблюдений, а контрастные переходы, от минимальных значений к максимальным значениям, контролируют положение осей аномалий [15].

Расчет полного градиента выполнен в автоматизированной программе KOSCAD 3D в модуле «Градиентные характеристики». Данная программа предназначена для вычисления в каждой точке исходной сети градиента поля вдоль профилей, вкрест простираания профилей, между слоями сети, полного градиента поля и направления полного градиента в плоскостях слоев и плоскостях разрезов.

Двумерная адаптивная энергетическая фильтрация геопотенциальных полей

Одной из основных задач обработки геофизических полей является выделение сигналов (аномалий) на фоне помех. С этой целью используются разнообразные приемы преобразования исходного поля, которые в конечном итоге описываются с позиции линейной или нелинейной фильтрации. Обоснованный выбор (или задание) математической модели поля и соответствующая ей постановка задачи преобразования поля являются исходным положением (принципом) в обработке геофизических данных [13].

Двумерной фильтрацией в геофизике принято называть фильтрацию по площади, которая сводится к реализации операции свертки в окне размером в NO пикетов и MO профилей. Выбор параметров фильтра осуществляется на основе анализа двумерной автокорреляционной функции исходного поля. Наклон фильтра совпадает с корреляционным направлением поля по площади наблюдения, которое также можно определить по ДАКФ [15].

Использование двумерного адаптивного фильтра позволяет эффективно обрабатывать нестационарные, в смысле спектрально-корреляционных характеристик, по площади поля. Большинство реально наблюдаемых полей нестационарны по площади, поэтому использование данного фильтра дает более корректные результаты, чем применение обычных двумерных фильтров с постоянными параметрами.

Расчёт коэффициента корреляции гравитационного и магнитного полей в скользящем окне

Расчет коэффициента корреляции между двумя признаками проводился в автоматизированной программе KOSCAD 3D в скользящем двумерном окне фиксированных размеров. Результирующая карта содержит коэффициент корреляции между двумя признаками. Модуль позволяет оценить значение обычного коэффициента корреляции

$$r_{xy} = \frac{1}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}} \sum_{i,j} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y}),$$

где $\bar{x}, \bar{y}, \sigma_x, \sigma_y$ соответственно оценки средних значений и среднеквадратических отклонений признаков x и y [15].

Результаты исследований. Характеристика гравитационных и магнитных аномалий

Гравитационные аномалии. В планетарном масштабе Алдано-Становому щиту соответствует глубокий минимум поля силы тяжести I порядка, обусловленный разуплотнением земной коры и верхней мантии [5]. В пределах щита выделяются три гравитационных блока, увязанных с тектоническими зонами – южным фрагментом Нимнырского террейна, Коларской зоной тектонического меланжа и северным окончанием Тындинского террейна (рис. 3). Блоки ограничены гравитационными ступенями северо-запад-западного простирания и коррелируют, с севера на юг, с Южно-Алданским и Становым региональными разломами. Наряду с субширотными, на схеме среднечастотной составляющей поля силы тяжести фиксируются две крупные гравитационные ступени северо-восточной ориентировки в центральной и юго-западной части рассматриваемой территории. Первая, соответствует Селигдар-Верхнетимптонской гравитационной аномалии и характеризует сокращенную мощность до 36-38 км коры пониженной плотности [5]. Вторая гравитационная ступень, учитывая структуру и интенсивность аномалий силы тяжести, вероятно, отражает глубинные неоднородности схожей природы. Поперечные к основному простиранию тектонических структур гравитационные ступени фиксируют блоковое строение Коларской тектонической зоны и указывают на увеличение мощности земной коры в юго-восточном направлении.

Магнитные аномалии. Структура аномального магнитного поля обусловлена тектоническим строением рассматриваемой территории. Выделяются три блока, контрастирующие интенсивностью и характером магнитных аномалий (рис. 4).

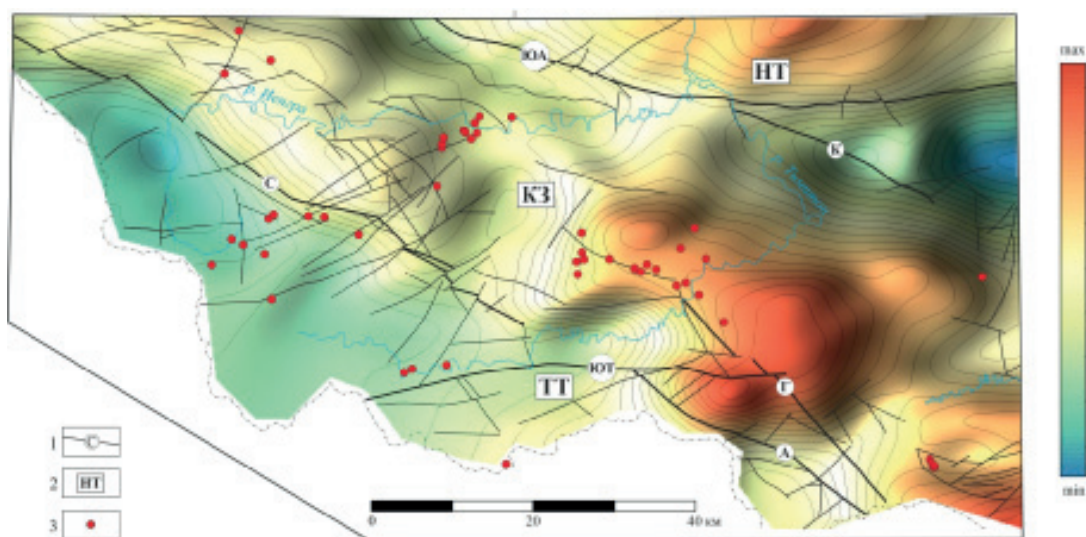


Рис. 3. Среднечастотная составляющая гравитационного поля исследуемой территории
1 – разломы: ЮА – Южно-Алданский, К – Кабактинский, С – Становой, ЮТ – Южно-Тимптонский, Г – Гонамский, А – Апсаханский, 2 – тектонические зоны: НТ – Нимнырский террейн, КЗ – Коларская зона тектонического меланжа, ТТ – Тындинский террейн, 3 – золоторудные месторождения.

Fig. 3. The average frequency component of the gravitational field of the studied area
1 – faults: UA – Yuzhno-Aldansky, K – Kabaktinsky, S – Stanovoy, UT – Yuzhno-Timptonsky, G – Gonamsky, A – Apsakhansky, 2 – tectonic zones: NT – Nimnyrsky terrane, KZ – Kolar zone of tectonic melange, TT – Tyndinsky terrane, 3 – gold deposits.

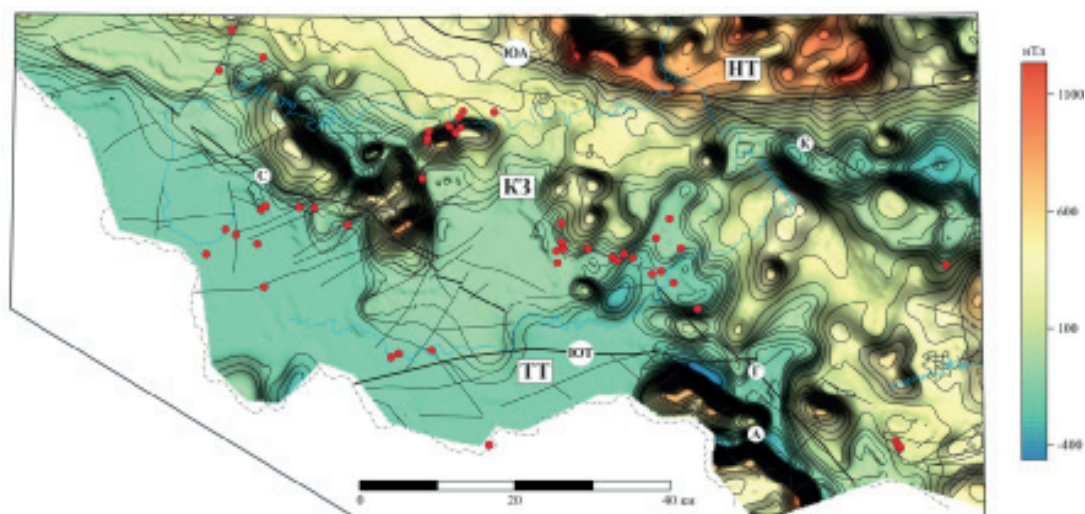


Рис. 4. Аномальное магнитное поле исследуемой территории

Условные обозначения см. рис. 3

Fig. 4. Anomalous magnetic field of the studied area

For symbols, see Fig. 3

Южному сегменту Нимнырского террейна соответствуют максимальные значения напряженности магнитного потенциала до 1012 нТл. Коларская зона отделена от Нимнырского террейна полосой высоких градиентов магнитного поля шириной до 6 км. Особенностью тектонической зоны является тенденция убывания среднего уровня магнитного потенциала в южном направлении и наличие дискордантных по отношению к генеральному простиранию структур Байкало-Алдано-Станового мегаблока линейных аномалий северо-восточной ориентировки. Повсеместно в Коларской зоне наблюдаются разноориентированные локальные изометричные и линейные магнитные аномалии положительного знака. Предполагается, что они сопряжены со скрытыми телами основных и ультраосновных пород, корни которых находятся в подошве литосферы на значительных глубинах [16, 5].

Северное окончание Тындинского террейна характеризуется спокойным слабоаномальным уровнем магнитного поля. Здесь фиксируются наиболее низкие значения магнитных аномалий -180 – -200 нТл. Сглаженный облик и низкая интенсивность геопотенциального поля связаны с широким развитием поздне- и синорогенных слабомагнитных гранитоидов.

Обсуждение. Трансформированные геофизические поля

Из анализа выполненных оценок статистических характеристик геопотенциальных полей в окне «живой» формы установлено, что наибольшей информативностью при выделении геологических неоднородностей характеризуется параметр дисперсии гравитационного поля (рис. 5).

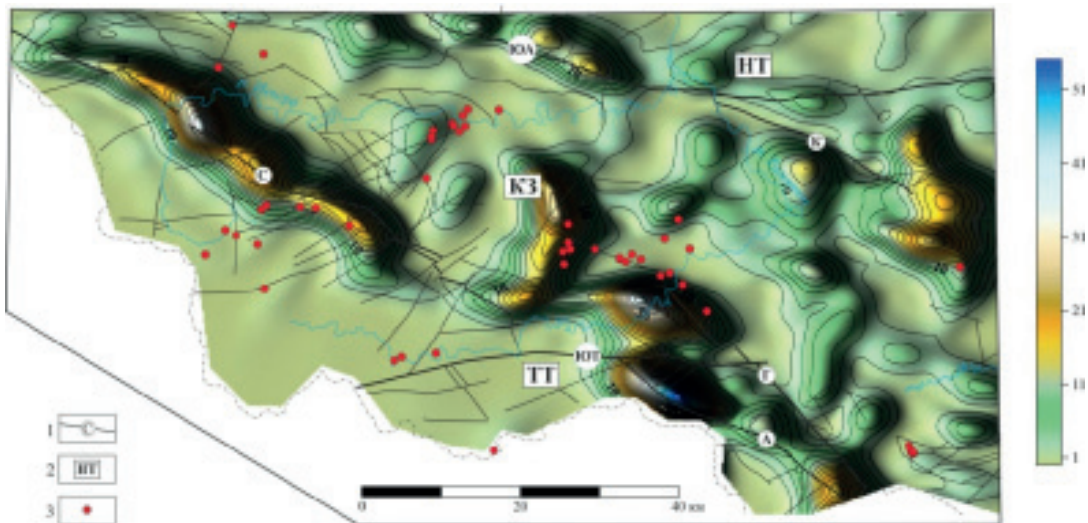
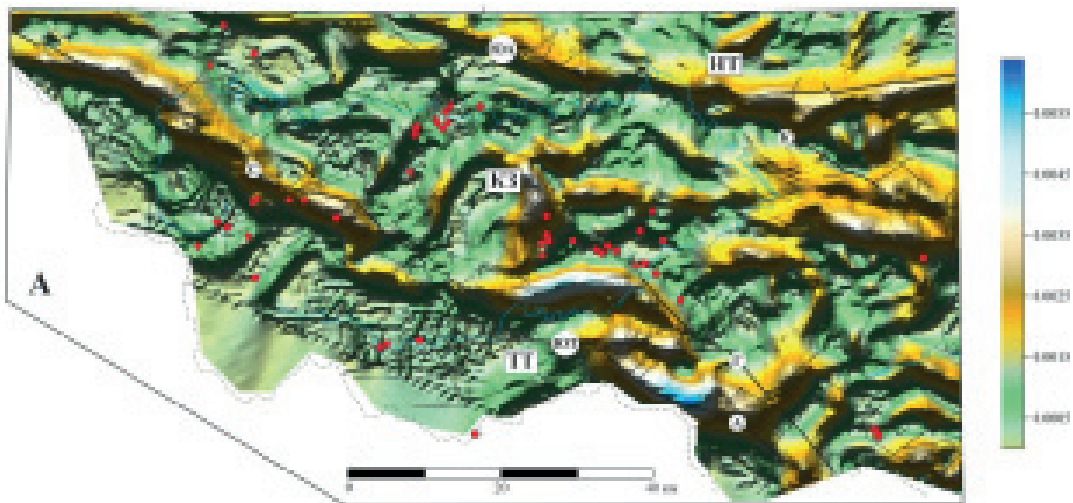


Рис. 5. Дисперсия аномального гравитационного поля исследуемой территории
Условные обозначения см. рис. 3.

Fig. 5. Dispersion of the anomalous gravitational field of the studied territory
For symbols, see Fig. 3.

На схеме трансформант максимальные значения дисперсии геопотенциальных полей фиксируют границы тектонических зон, а также указывают на развитие поперечных геологических структур в Коларской зоне. Отмечается приуроченность золотого оруденения к высокоинтенсивным значениям дисперсии гравитационного поля.

Результаты расчета градиентных характеристик гравитационных и магнитных полей показали, что экстремальными значениями выделяются тектонические границы, увязанные с Южно-Алданским и Становым разломами. На схемах трансформант подчеркивается сложное строение Коларской зоны тектонического меланжа. Помимо дискордантных линейных неоднородностей северо-восточного простирания, наблюдаются линейные аномалии субширотной ориентировки, а также кольцевого характера (рис. 6).



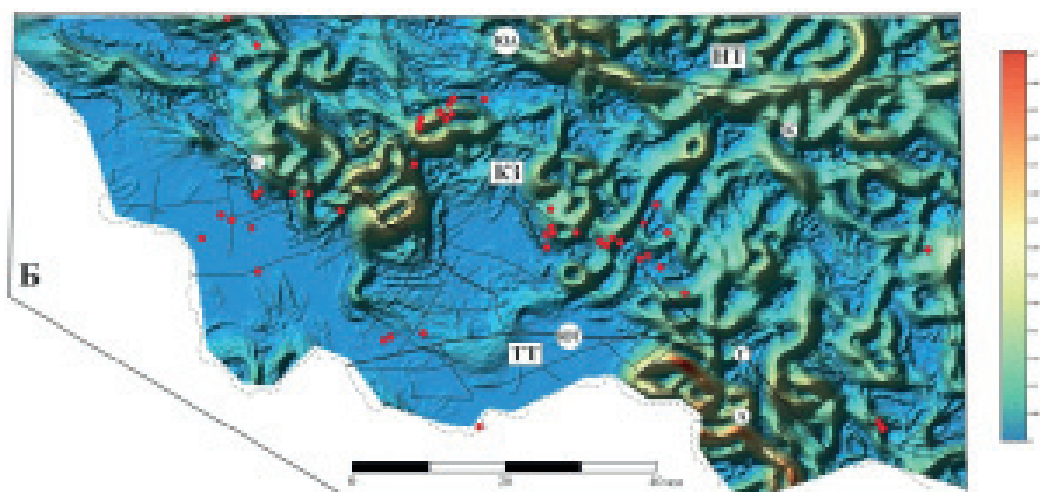


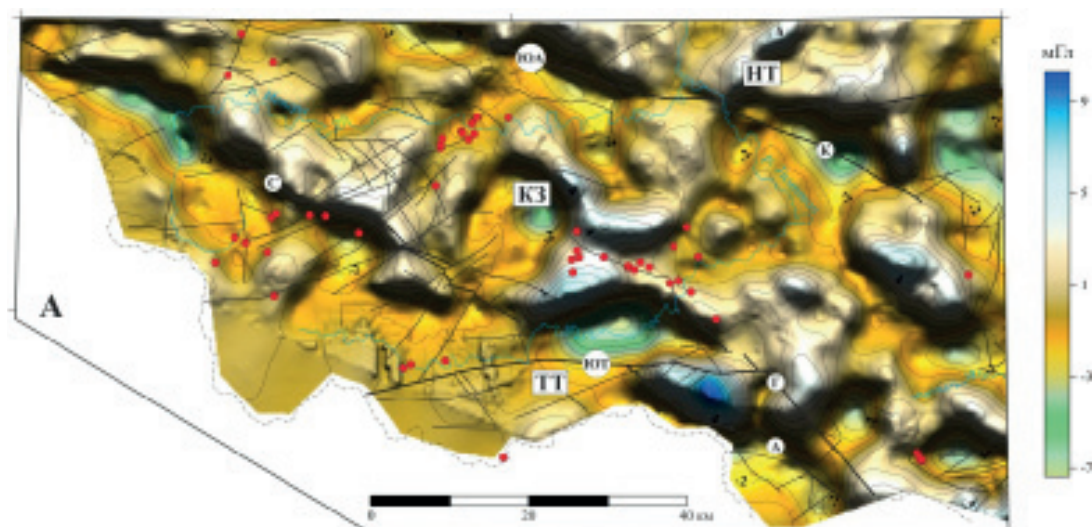
Рис. 6. Полные градиенты аномального гравитационного (А) и магнитного (Б) полей исследуемой территории

Условные обозначения см. рис. 3.

Fig. 6. Full gradients of anomalous gravitational (A) and magnetic (B) fields of the studied territory
For symbols, see Fig. 3.

В аномалиях полного градиента гравитационного потенциала золотое оруденение, преимущественно, тяготеет к высокоинтенсивным линейным аномалиям северо-западного и северо-восточного простираний, а также к зонам их сопряжений. В трансформированном магнитном поле золоторудные месторождения приурочены, в основном, к аномалиям положительного знака различной формы и простирания.

На схеме локальной составляющей гравитационного поля зонами высоких горизонтальных градиентов выделяются границы основных тектонических зон (рис. 7А).



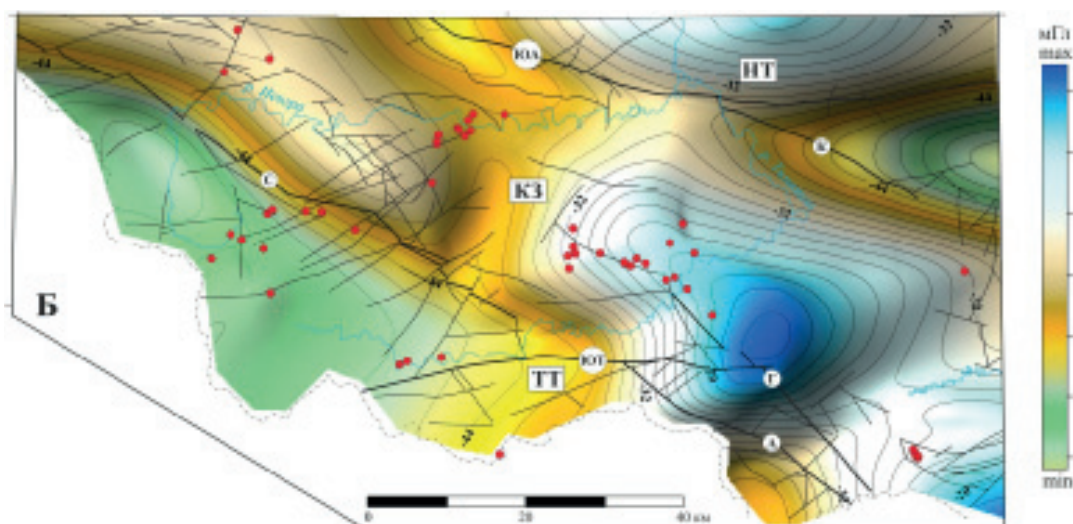


Рис. 7. Локальная (А) и региональная (Б) составляющие гравитационного поля исследуемой территории
Условные обозначения см. рис. 3

Fig. 7. Local (A) and regional (B) components of the gravitational field of the studied territory
For symbols, see Fig. 3

В Коларской зоне тектонического меланжа кроме линейных локальных аномалий отмечается повышенная концентрация изометричных минимумов, обрамленных полосами повышенных значений гравитационного поля. Выделенные участки разуплотнения рассматриваются исследователями в качестве палеомагматических очагов [5, 16]. Известные месторождения золота размещаются в узких линейных локальных аномалиях отрицательного знака, в зонах высоких градиентов, увязанных со Становым разломом, а также в положительных аномалиях, обрамляющих гравитационные минимумы.

Региональная компонента гравитационного поля отражает характер строения рельефа кристаллического фундамента рассматриваемой территории (рис. 7Б). Фундамент консолидированной коры центральной и юго-западной части Коларской зоны и, вероятно, Тындинского террейна осложнен широкими до 9,5 км зонами разуплотнения. Отмечается приуроченность золотого оруденения к склонам сводовых поднятий фундамента близ зон разуплотнения северо-восточной ориентировки.

На схеме локальной составляющей магнитного поля выделяются аномалии, преимущественно, изометричной формы и положительного знака (рис. 8А). Исключение составляют редкие линейные аномалии, коррелирующие с разрывными структурами. Высокочастотные аномалии отражают близповерхностные магнитовозмущающие объекты, связанные, вероятно, со вскрытыми и нескрытыми интрузивами.

Региональные аномалии магнитного потенциала свидетельствуют о наличии двух типов кристаллического основания в пределах рассматриваемой территории (рис. 8Б). Первый, в структурном отношении охватывает Нимырский террейн и большую часть Коларской тектонической зоны и характеризуется высокой интенсивностью магнитных аномалий. Второй тип, расположен, преимущественно, в пределах Тындинского террейна, ему соответствует спокойный слабоинтенсивный уровень магнитного поля. Предполагается, что первый тип образован магнитовозмущающими архейскими образованиями, второй – слабомагнитными комплексами протерозойского возраста. Известные золоторудные месторождения размещаются в полосе горизонтальных градиентов регионального магнитного поля шириной 5-6 км, отражающих верхнюю кромку магнитовозмущающих масс.

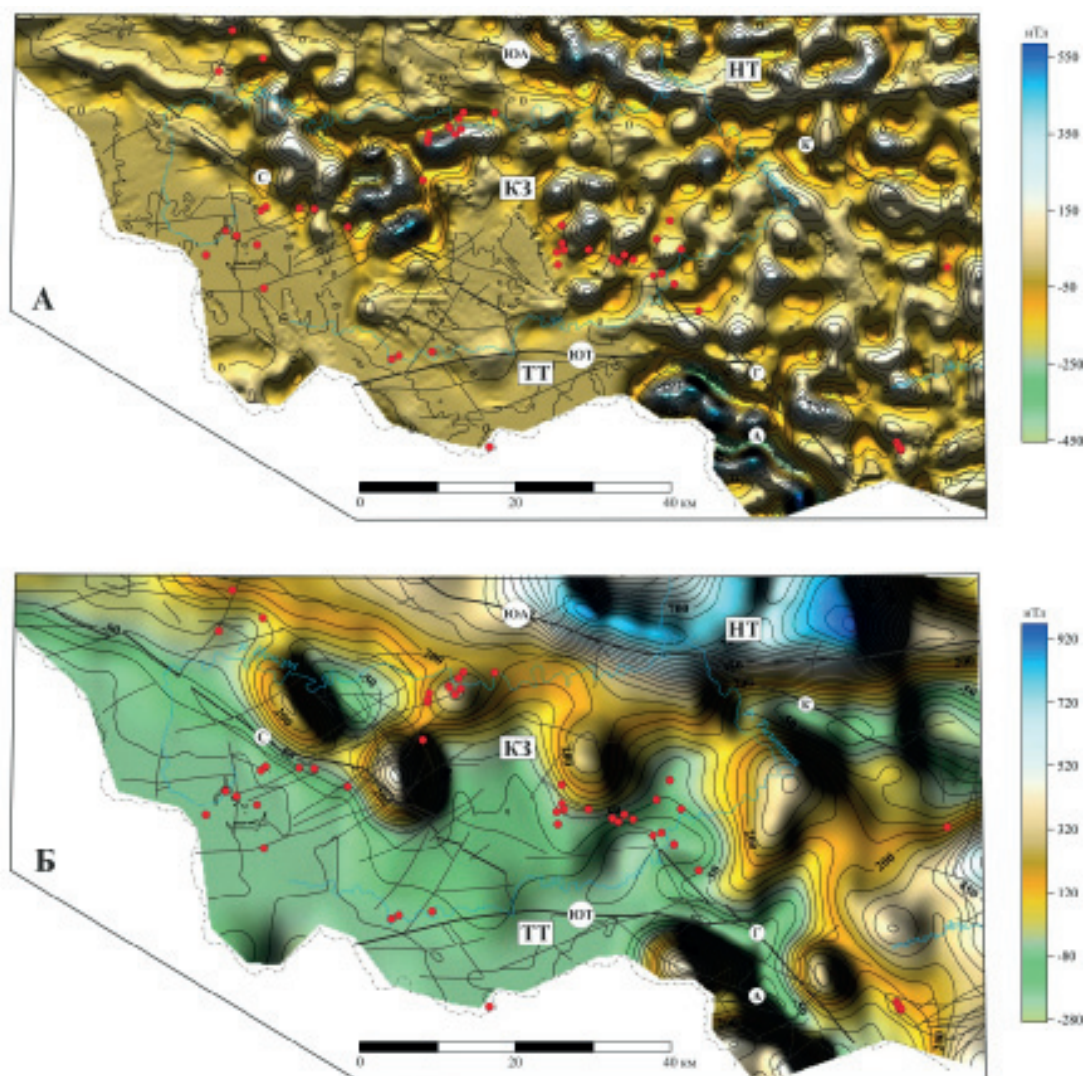


Рис. 8. Локальная (А) и региональная (Б) составляющие магнитного поля исследуемой территории

Условные обозначения см. рис. 3

Fig. 8. Local (A) and regional (B) components of the magnetic field of the studied territory

For symbols, see Fig. 3

Для разрывных структур исследуемой территории характерны высокие значения коэффициента корреляции гравитационного и магнитного полей (рис. 9). Установлено, что золотое оруденение локализуется в зонах с высоким коэффициентом парной корреляции.

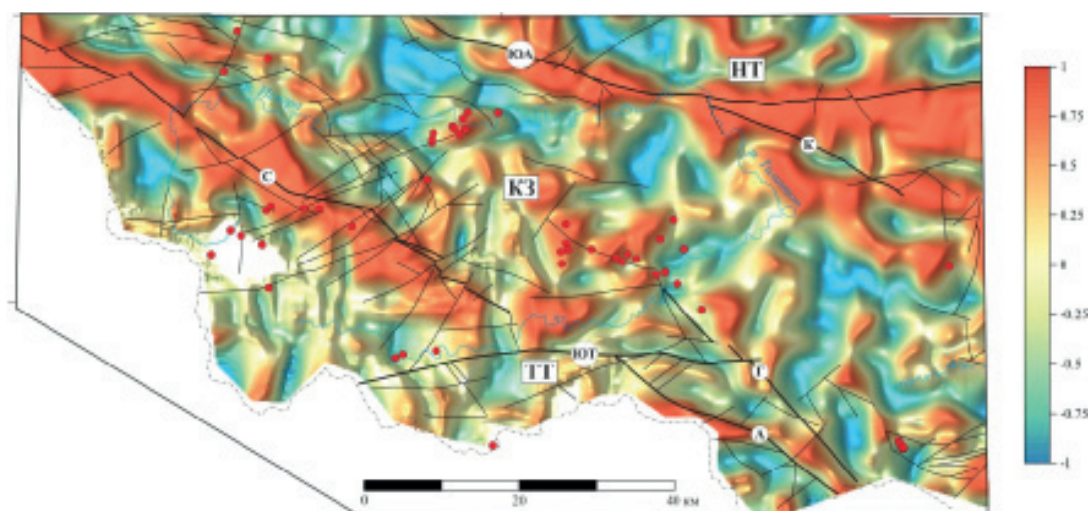


Рис. 9. Схема значений коэффициентов корреляции гравитационного и магнитного полей исследуемой территории

Условные обозначения см. рис. 3

Fig. 9. Diagram of the values of the correlation coefficients of the gravitational and magnetic fields of the studied territory

For symbols, see Fig. 3

Закключение

В пределах Алдано-Станового щита выделяются три гравитационных блока, увязанные с южным фрагментом Нимнырского террейна, Коларской зоной тектонического меланжа и северным окончанием Тындинского террейна. В структуре аномального магнитного поля также отмечаются три блока, контрастирующие интенсивностью и характером магнитных аномалий. Разноориентированные локальные изометричные и линейные магнитные аномалии положительного знака отражают скрытые тела основных и ультраосновных пород.

На основе анализа трансформированных геофизических полей установлены следующие закономерности проявления золотого оруденения. Известные золоторудные месторождения рассматриваемой территории приурочены к высокоинтенсивным значениям дисперсии и полного градиента гравитационного потенциала северо-западного и северо-восточного простираний, а также к зонам их сопряжений. Оруденение локализуется в положительных аномалиях, обрамляющих гравитационные минимумы, отражающих кислые магматические образования.

Отмечается тяготение золотого оруденения к градиентам региональных геофизических аномалий положительного знака, увязанных со склонами сводовых поднятий фундамента близ зон разуплотнения северо-восточной ориентировки. Дополнительным геофизическим критерием размещения золоторудных месторождений центральной части Алдано-Станового щита является их локализация в зонах с высоким коэффициентом парной корреляции.

Литература

1. Молчанов, А.В. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции / А.В. Молчанов, А.В. Терехов, В.В. Шатов, О.В. Петров, К.А. Кукушкин, Д.С. Козлов, Н.В. Шатова – Текст: непосредственный // Металлогения, 2017. – С. 93-111.
2. Адаров, Т.Д. Геофизические исследования рудоконтролирующих структур Южного Верхоянья / Т.Д. Адаров, Е.Э. Соловьев. – Текст : непосредственный // Разведка и охрана недр, 2013. № 12. С. 33-35.

3. Фридовский, В.Ю. Орогенные золоторудные месторождения со значительным ресурсным потенциалом центральной части Яно-Колымского пояса / В.Ю. Фридовский, Л.И. Полуфунтикова, Г.Н. Гамянин, Е.Э. Соловьев // Разведка и охрана недр, 2015. – № 11. – С. 3-9.
4. Духовский, А.А. Выделение по гравиметрическим данным разноранговых рудоносных площадей как основы для прогнозных построений (на примере складчатых областей Забайкалья – Дальнего Востока) / А.А. Духовский, Н.А. Артамонова – Текст: непосредственный // Отечественная геология. 2005. – № 4. – С. 77–84.
5. Хомич, В.Г. Структурная позиция крупных золоторудных районов Центрально-Алданского (Якутия) и Аргунского (Забайкалье) супертеррейнов / В.Г. Хомич, Т.Г. Борискина. – Текст: непосредственный // Геология и геофизика, 2010, т. 51, № 6, С. 849-862.
6. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Российская Академия наук, Сибирское отделение, Институт геологии алмаза и благородных металлов [и др.]; ответственные редакторы: Л. М. Парфенов, М. И. Кузьмин. – Москва: Наука/Интерпериодика, 2001. – 570 с. – Текст: непосредственный.
7. Молчанов, А.В. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции / А.В. Молчанов, А.В. Терехов, В.В. Шатов, О.В. Петров, К.А. Кукушкин, Д.С. Козлов, Шатова Н.В. – Текст: непосредственный // Металлогения, 2017. – С. 93-111.
8. Гравиметрическая карта Республики Саха (Якутия). <https://vsegei.ru/ru/info/gisatlas/dvfo/yakutia/grav.jpg>
9. Гравиметрическая карта России и прилегающих территорий масштаба 1:2500000. Отв. редакторы: Степанов П.П., Янушевич М.А. Министерство природных ресурсов и экологии РФ, 2016.
10. Миронов, В.С. Курс гравиразведки: учебник для вузов / В.С. Миронов. – Ленинград: Недра, 1980. – 543 с. – Текст: непосредственный
11. Серкерев, С.А. Гравиразведка и магниторазведка: Учеб. для студентов вузов / С.А. Серкерев – Москва: Недра, 1999. 437 с. – Текст: непосредственный.
12. Никитин, А. А. Развитие статистических приемов обработки и интерпретации геофизических полей в компьютерной технологии КОСКАД 3D / А.А. Никитин, А. В. Петров, С. В. Зиновкин. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. Москва, 2007. № 6. – С. 68-74.
13. Никитин, А. А. Теоретические основы обработки геофизической информации: учебное пособие для студентов вузов / А.А. Никитин, А.В. Петров. – Москва: ЦИТвП, 2008. С. 112. – Текст: непосредственный
14. Никитин, А. А. Теоретические основы обработки геофизической информации: учебник для вузов / А.А. Никитин. – Москва: Недра, 1986. – 342 с. – Текст: непосредственный.
15. Никитин, А.А. Руководство пользователя. KOSCAD 3d / А.А. Никитин, А.В. Петров, А.С. Алексакин. – 2019.
16. Абрамов, В.А. Глубинное строение Центрально-Алданского района / В.А. Абрамов; Российская академия наук, Дальневосточное отделение, Тихоокеанский океанологический институт. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 180 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Molchanov, A.V. Zolotorudnye rajony i uzly Aldano-Stanovoj metallogenicheskoy provincii / A.V. Molchanov, A.V. Terehov, V.V. Shatov, O.V. Petrov, K.A. Kukushkin, D.S. Kozlov, N.V. Shatova – Tekst: neposredstvennyj // Metallogeniya, 2017. – S. 93-111.
2. Adarov, T.D. Geofizicheskie issledovaniya rudokontrolirujushhih struktur Juzhnogo Verhojan'ja / T.D. Adarov, E.Je. Solov'ev. – Tekst: neposredstvennyj // Razvedka i ohrana nedr, 2013. № 12. S. 33-35.
3. Fridovskij, V.Ju. Orogennye zolotorudnye mestorozhdenija so znachitel'nyy resursnyy potencialom central'noj chasti Jano-Kolym'skogo pojasa / V.Ju. Fridovskij, L.I. Polufuntikova, G.N. Gamjanin, E.Je. Solov'ev // Razvedka i ohrana nedr, 2015. – № 11. – S. 3-9.

4. Duhovskij, A.A. Vydelenie po gravimetricheskim dannym raznorangovyh rudonosnyh ploschadej kak osnovy dlja prognoznyh postroenij (na primere skladchatyh oblastej Zabajkal'ja – Dal'nego Vostoka) / A.A. Duhovskij, N.A. Artamonova – Tekst: neposredstvennyj // Otechestvennaja geologija. 2005. – № 4. – S. 77–84.
5. Homich, V.G. Strukturnaja pozicija krupnyh zolotorudnyh rajonov Central'no-Aldanskogo (Jakutija) i Argunskogo (Zabajkal'e) superterrejnov / V.G. Homich, T.G. Boriskina. – Tekst: neposredstvennyj // Geologija i geofizika, 2010, t. 51, № 6, S. 849-862.
6. Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Saha (Jakutija) / Rossijskaja Akademija nauk, Sibirskoe otdelenie, Institut geologii almaza i blagorodnyh metallov [i dr.]; otvetstvennye redaktory: L. M. Parfenov, M. I. Kuz'min. – Moskva: Nauka/Interperiodika, 2001. – 570 s. – Tekst: neposredstvennyj.
7. Molchanov, A.V. Zolotorudnye rajony i uzly Aldano-Stanovoj metallogenicheskoj provincii / A.V. Molchanov, A.V. Terehov, V.V. Shatov, O.V. Petrov, K.A. Kukushkin, D.S. Kozlov, Shatova N.V. – Tekst: neposredstvennyj // Metallogeniya, 2017. – S. 93-111.
8. Gravimetricheskaja karta Respubliki Saha (Jakutija). <https://vsegei.ru/ru/info/gisatlas/dvfo/yakutia/grav.jpg>
9. Gravimetricheskaja karta Rossii i priliegajushchih territorij masshtaba 1:2500000. Otv. redaktory: Stepanov P.P., Janushevich M.A. Ministerstvo prirodnyh resursov i jekologii RF, 2016.
10. Mironov, V.S. Kurs gravirazvedki: uchebnik dlja vuzov / V.S. Mironov. – Leningrad: Nedra, 1980. – 543 s. – Tekst: neposredstvennyj
11. Serkerov, S.A. Gravirazvedka i magnitorazvedka: Ucheb. dlja studentov vuzov / S.A. Serkerov – Moskva: Nedra, 1999. 437 s. – Tekst: neposredstvennyj.
12. Nikitin, A. A. Razvitie statisticheskikh priemov obrabotki i interpretacii geofizicheskikh polej v komp'juternoj tehnologii KOSKAD 3D / A.A. Nikitin, A. V. Petrov, S. V. Zinovkin. – Tekst: neposredstvennyj // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geologija i razvedka. Moskva, 2007. № 6. – S. 68-74.
13. Nikitin, A. A. Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoi informacii: uchebnoe posobie dlja studentov vuzov / A.A. Nikitin, A.V. Petrov. – Moskva: CITvP, 2008. S. 112. – Tekst: neposredstvennyj
14. Nikitin, A. A. Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoi informacii: uchebnik dlja vuzov / A.A. Nikitin. – Moskva: Nedra, 1986. – 342 s. – Tekst: neposredstvennyj.
15. Nikitin, A.A. Rukovodstvo pol'zovatelja. KOSCAD 3d / A.A. Nikitin, A.V. Petrov, A.S. Aleksashin. – 2019.
16. Abramov, V.A. Glubinnoe stroenie Central'no-Aldanskogo rajona / V.A. Abramov; Rossijskaja akademija nauk, Dal'nevostochnoe otdelenie, Tihookeanskij okeanologicheskij institut. – Vladivostok: Dal'nauka, 1995. – 180 s. – Tekst: neposredstvennyj.

Сведения об авторах

СОЛОВЬЕВ Евгений Эдуардович – к.г.-м.н., проректор Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова по науке и инновациям, e-mail: solov.evg@yandex.ru

SOLOVIEV Evgeny Eduardovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Vice Rector for Science and Innovations, Ammosov North-Eastern Federal University, e-mail: solov.evg@yandex.ru

КУДРИН Максим Васильевич – к.г.-м.н., и.о. зав. лабораторией геологии и минералогии Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, e-mail.ru: kudrinmv@mail.ru

KUDRIN Maksim Vasilievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Acting head Laboratory of Geology and Mineralogy, Institute of Diamond and Precious Metals Geology SB RAS, e-mail.ru: kudrinmv@mail.ru

УДК 378.4.013:550(571.56-25)
DOI 10.25587/SVFU.2023.30.2.003

О. Г. Третьякова¹, М. Ф. Третьяков¹, Н. М. Третьякова²

¹ Северо-восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

e-mail: og.tretiakova@s-vfu.ru

e-mail: mf.tretiakov@s-vfu.ru

e-mail: natatretiakova2003@gmail.com

ИНТЕГРАЦИЯ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ MICROMINE ORIGIN & BEYOND В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ГЕОЛОГОРАЗВЕДЧОГО ФАКУЛЬТЕТА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Аннотация. В настоящее время в геологической отрасли особое внимание уделяется современным технологиям и компьютерным программам. Статья описывает сотрудничество Северо-Восточного федерального университета и ООО «Майкромайн Рус», направленное на обучение студентов современным технологиям горно-геологической отрасли. Рассмотрены вопросы обеспечения горно-геологических работ при разработке месторождений и подготовки специалистов геологической отрасли на геологоразведочном факультете Северо-Восточного Федерального университета, проводимые при непосредственной поддержке компании ООО «Майкромайн Рус», а также внедрении в учебный процесс программного комплекса Micromine Origin & Beyond. Студенты, занимающиеся в компьютерном классе геологического моделирования, могут визуализировать и понимать геологические характеристики и особенности месторождений, принимают участие в студенческой лиге международного инженерного чемпионата «CASE-IN». Это позволяет выпускникам ГРФ получить цифровые компетенции, необходимые для успешного трудоустройства и быстрой адаптации к производственному процессу на горно-геологических предприятиях.

Ключевые слова: геологическое образование, образовательный процесс, оценка запасов, моделирование, каркасная модель, Майкромайн, Micromine.

O. G. Tretiakova¹, M. F. Tretiakov¹, N. M. Tretiakova²

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

² Russian State Agrarian University – K. A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy

e-mail: og.tretiakova@s-vfu.ru

e-mail: mf.tretiakov@s-vfu.ru

e-mail: natatretiakova2003@gmail.com

INTEGRATING MGIS MICROMINE ORIGIN & BEYOND INTO THE EDUCATIONAL PROCESS AT THE GEOLOGICAL PROSPECTING FACULTY OF THE M. K. AMMOSEV NORTH-EASTERN FEDERAL UNIVERSITY

Abstract. Currently, the geological field places special attention on modern technology and computer programs. The article describes the collaboration between the North-Eastern Federal University and LLC «Micromine Rus» aimed at educating students in modern technologies of the mining and geological industry. The article considers the issues of training geological specialists at the Geological Prospecting Faculty of the North-Eastern Federal University with the direct support of Micromine Rus and integrating Micromine Origin & Beyond software into the educational process. Students engaged in geological modeling in the computer class can visualize and understand the geological characteristics and features of deposits, participate in the student league of the international engineering championship «CASE-IN». This allows graduates to acquire digital competencies

essential for successful employment and quick adaptation to the industrial process at mining and geological enterprises.

Keywords: geological education, educational process, assessment of reserves, Micromine Origin & Beyond.

Актуальным направлением подготовки квалифицированных и востребованных кадров в геологической отрасли является владение выпускниками вузов инновационными техническими средствами и технологиями, применяемыми для решения задач геологической направленности, облегчающие работу персоналу, способствующие повышению качества и точности выполняемых ими задач: от геологоразведки до контроля эксплуатации месторождений.

Помимо классических и практикоориентированных методов подготовки специалистов, на геологоразведочном факультете Северо-Восточного федерального университета большое внимание уделяется обучению студентов современным технологиям, применяемым в горно-геологической отрасли. Следуя современным тенденциям, в конце 2018 года СВФУ и ООО «Майкромайн Рус» начали свое сотрудничество. На геологоразведочном факультете компанией был открыт компьютерный класс геологического моделирования (рис.1), оснащенный компьютерным оборудованием и передовым в горно-геологической отрасли программным обеспечением (ПО) Micromine Origin & Beyond. Благодаря 3D графике программа Micromine Origin & Beyond позволяет студентам визуализировать и понимать геологические характеристики, пластов, особенности месторождений, различия в залегании рудных тел и готовит их к началу работы на предприятиях. Цифровые компетенции, полученные выпускниками, влияют на успешное трудоустройство молодых специалистов и являются залогом развития отрасли.

Для интеграции горно-геологической информационной системы в процесс обучения были изменены учебные планы по программам специальности «Прикладная геология» (рис. 2). Теперь студенты на протяжении трех семестров работают с новейшими версиями Micromine Origin & Beyond в рамках дисциплины «Технологии ГИС», обрабатывают данные, полученные на практике, участвуют в студенческой лиге международного инженерного чемпионата «CASE-IN» и, как результат, выполняют написание специального вопроса при дипломном проектиро-



Рис. 1. На фото ректор Северо-Восточного федерального университета А.Н. Николаев и генеральный директор компании «Майкромайн Рус» Б.В. Курцев. Подписание соглашения о сотрудничестве во время открытия компьютерного класса ГРФ СВФУ

Fig. 1. The photo shows the Rector of North-Eastern Federal University, A.N. Nikolaev, and the General Director of Micromine Rus, B.V. Kurtsev. Signing an agreement on cooperation during the opening of the computer class at the GPF NEFU



Рис. 2. Схема внедрения ГГИС Micromine Origin & Beyond в учебный процесс ГРФ СВФУ

Fig. 2. Scheme of implementation of Micromine Origin & Beyond in the educational process of the GPF NEFU

вании. В процессе обучения студентов ГРФ специальности «Прикладная геология» внимание уделяется 3D моделированию геологической среды, созданию и управлению баз геологических данных, построению каркасных и блочных моделей месторождений, оценке запасов, оптимизации и проектированию карьеров и буровзрывных работ и, в целом, освоению новых инструментов проектирования.

В своих дипломных проектах будущие специалисты моделируют распределение полезных компонентов, проводят подсчет запасов полезных ископаемых. В качестве примера можно привести выпускную квалификационную работу Индеева Ивана, выпускника группы РМ-16. Им по данным, полученным после прохождения производственной практики и при использовании ГГИС Micromine Origin & Beyond, был построен каркас рудного тела, посчитаны ожидаемые запасы серебра, свинца и цинка по категории C_2 на рудопроявлении Авар (табл. 1), а также подготовлены модели распределения полезных компонентов (рис. 3).

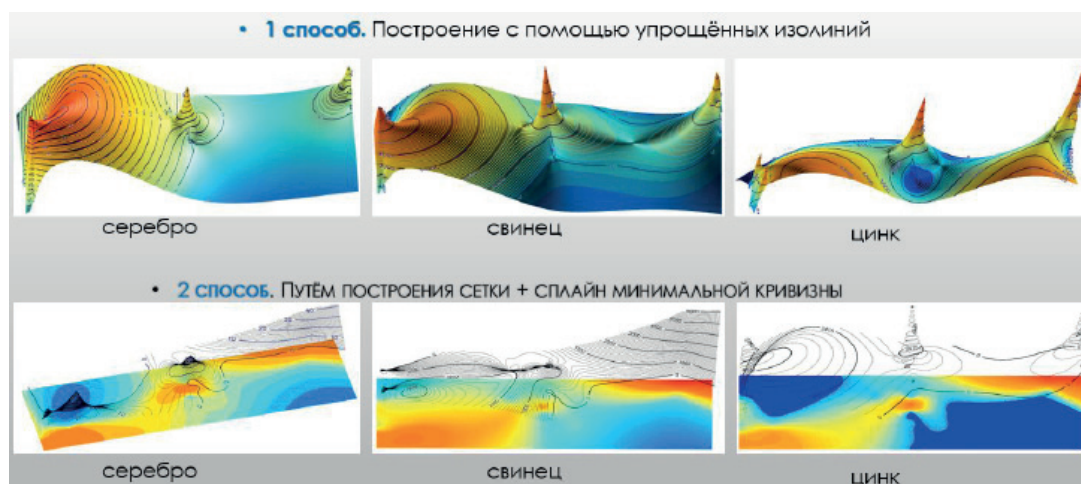


Рис. 3. Моделирование распределения Ag, Pb, Zn в пределах рудопоявления Авар

Fig. 2. Modeling of Ag, Pb, Zn distribution within the Avar ore occurrence

Таблица – Ожидаемые запасы по категории C2 на участке Авар

Объём (м³)	Содержание Ag (г/т)	Запасы Ag (кг)	Pb (г/т)	Запасы Pb (кг)	Zn (г/т)	Запасы Zn (кг)
55989,95	39,913	6033,727	3626,344	547751,244	3548,636	536457,515

Подготовка специалистов, владеющих горно-геологическими информационными системами, особенно актуальна для предприятий, которые располагают интегрированными системами, требующими затраты временных ресурсов и средств на начальное обучение персонала и освоение ряда их функциональных возможностей. В этой связи подготовка горных инженеров-геологов, владеющих базовыми навыками работы в Micromine Origin & Beyond, позволяет выпускнику быстро адаптироваться к производственному процессу в условиях предприятия. [1]

За пять лет сотрудничества с компанией ООО «Майкромайн Рус» навыки владения программными продуктами компании получили более 150 студентов. Выпускники геологоразведочного факультета, наиболее успешно освоившие ГГИС Micromine Origin & Beyond, получают от компании сертификаты международного образца (рис. 4), которые им вручаются вместе с дипломами о высшем образовании. Данный сертификат дает студентам значительные преимущества при трудоустройстве на горно-геологические предприятия.

В 2022 г. двое сотрудников факультета прошли сертификацию на право проведения курсов от компании ООО «Майкромайн Рус» с выдачей им сертификатов международного образца.

Моделирование в Micromine Origin & Beyond позволило сотрудникам ГРФ получить каркасную модель Томпонского учебного полигона СВФУ (рис. 5) используя только геологическую карту и топооснову [2, 3]. Таким образом, совершенствование графических материалов даст возможность студентам более подробно ознакомиться с геологическими структурами, скрытыми под поверхностью. Полученный опыт моделирования является заделом для проведения дальнейшего моделирования, привлекая студентов к получению ими новых цифровых компетенций.

В настоящее время происходит постепенное наращивание цифровых навыков и компетенций у студентов, планируется внедрение дисциплин с освоением Micromine Origin & Beyond



Рис. 4. На фото Третьякова О.Г., преподаватель ГРФ СВФУ, со студентами группы РМ-16 (Иванов Егор, Ноговицына Наталья, Индеев Иван) получившими сертификаты, подтверждающие владение программным продуктом компании Micromine

Fig. 3. In the photo, Tretyakova O.G., a teacher of the NEFU GRE, with students of the RM-16 group (Egor Ivanov, Natalia Nagovitsyna, Ivan Indeev) who received certificates confirming ownership of the Micromine software product

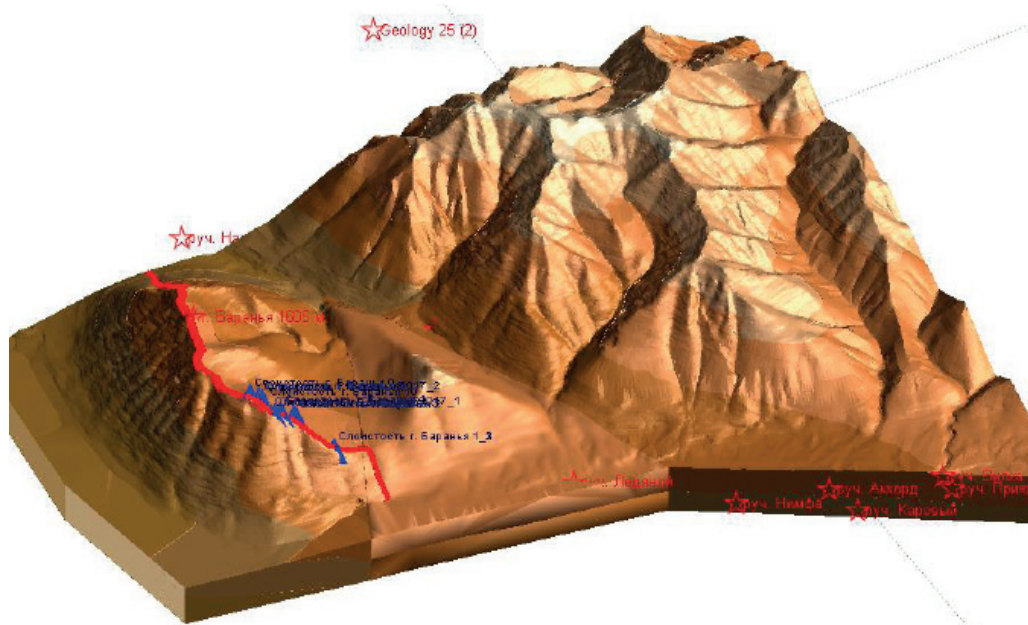


Рис. 5. Каркасная модель водоразделов горы Сардана и горы Баранья

Fig. 4. A frame model of the watersheds of Mount Sardana and Mount Baranya.

в учебные планы для студентов, обучающихся по специальности 21.05.03 Технология геологической разведки. Все это говорит о том, что на геологоразведочном факультете Северо-Восточного федерального университета готовят конкурентоспособных и востребованных инженеров-геологов.

Литература

1. Мосейкин, В.В. Подготовка специалистов в области геолого-маркшейдерского обеспечения горных работ в рамках реализации проекта Micromine-вуз. / В.В. Мосейкин, Г.О. Абрамян, Н.П. Сапронова, М.М. Столяров. – Текст: непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 4. – С. 246-250.
2. Третьякова, О.Г. Построение геологической каркасной модели правобережья р. Кюрбелях (Томпонский полигон СВФУ) В ГГИС Майкромайн / О.Г. Третьякова, М.Ф. Третьяков, Ф.Ф. Третьяков. – Текст: непосредственный // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. – 2021. – № 4 (24). С. 44-52.
3. Третьякова, О.Г. Сравнение методов построения геологических каркасных моделей, применяемых в горно-геологических информационных системах, на примере Томпонского полигона СВФУ / О.Г. Третьякова, М.Ф. Третьяков, Ф.Ф. Третьяков, И.Ф. Охлопкова. – Текст непосредственный // Геология и минерально – сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 65-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН. – Якутск. – 2022. – С. 130-133.

References

1. Mosejkin, V.V. Podgotovka specialistov v oblasti geologo-markshejderskogo obespechenija gornyh rabot v ramkah realizacii proekta Micromine-vuz. / V.V. Mosejkin, G.O. Abramjan, N.P. Saproнова, M.M. Stoljarov. – Tekst: neposredstvennyj // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. – 2016. – № 4. – С. 246-250.
2. Tret'jakova, O.G. Postroenie geologicheskoy karkasnoj modeli pravoberezh'ja r. Kjurbeljah (Tomponskij poligon SVFU) V GGIS Majkromajn / O.G. Tret'jakova, M.F. Tret'jakov, F.F. Tret'jakov. – Tekst: neposredstvennyj // Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. Serija: Nauki o Zemle. – 2021. – № 4 (24). S. 44-52.
3. Tret'jakova, O.G. Sravnenie metodov postroenija geologicheskikh karkasnyh modelej, primenjaemyh v gorno-geologicheskikh informacionnyh sistemah, na primere Tomponskogo poligona SVFU / O.G. Tret'jakova, M.F. Tret'jakov, F.F. Tret'jakov, I.F. Ohlopкова. – Tekst neposredstvennyj // Geologija i mineral'no – syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii. Materialy XII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashhennoj 65-letiju Instituta geologii almaza i blagorodnyh metallov Sibirskogo otdelenija RAN. – Jakutsk. – 2022. – S. 130-133.

Сведения об авторах

ТРЕТЬЯКОВА Ольга Геннадьевна – старший преподаватель кафедры прикладной геологии геологоразведочного факультета Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, e-mail: og.tretiakova@s-vfu.ru

TRETYAKOVA Olga Gennadievna – Senior Lecturer, Department of Applied Geology, Geological Prospecting Faculty, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, e-mail: og.tretiakova@s-vfu.ru

ТРЕТЬЯКОВ Максим Феликсович – к.г.-м.н., декан геологоразведочного факультета Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, e-mail: mf.tretiakov@s-vfu.ru

TRETYAKOV Maksim Feliksovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, dean, Geological Prospecting Faculty, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, e-mail: mf.tretiakov@s-vfu.ru

ТРЕТЬЯКОВА Наталья Максимовна – студентка института агробиотехнологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, e-mail: natatretiakova2003@gmail.com

TRETYAKOVA Natalya Maksimovna – student of the Institute of Agrobiotechnology of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian State Agrarian University – K. A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy, e-mail: natatretiakova2003@gmail.com

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 528.8; 630.52

DOI 10.25587/SVFU.2023.30.2.004

*Ю. Г. Данилов¹, Табриз Мубариз оглы Тахмазов²*¹ Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск, Россия² Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Республика Азербайджан

e-mail: dan57sakha@mail.ru

e-mail: thmzov.tbriez66@gmail.com

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЛЛОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕРЕВЬЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Аннотация. В последние десятилетия быстрое развитие технологий дистанционного зондирования привело к разработке различных методов по определению количества надземной биомассы по спутниковым изображениям. Были построены регрессионные уравнения связывающие полевые оценки надземной биомассы и вегетационные индексы, полученные методами дистанционного зондирования. Такие исследования позволяют не только оперативно контролировать состояние обширных лесных массивов, но и решить задачу оценки глобальных запасов углерода на планете. Целью исследования является создание основ для разработки новых методик по вопросам определения аллометрических показателей методами дистанционного зондирования. Задачами исследования являются определение с использованием технологий дистанционного зондирования (1) суммарной массы деревьев леса, состоящего из числа участков, отличающихся друг от друга количеством и видом деревьев; (2) суммарной массы гетерогенного леса, в котором существует определенная функциональная связь между $NDVI$ и количеством стволов (SN) на определенном участке; (3) модельной связи между $NDVI$ и такими аллометрическими показателями как высота дерева (H) и диаметр кроны (CD). Результаты исследований: решены некоторые задачи аллометрических измерений с применением методов дистанционного зондирования. Получена формула для вычисления биологической массы деревьев в лесу с использованием значений нормализованного разностного вегетационного индекса ($NDVI$) на отдельных участках леса; аналогичная задача для случая наличия функциональной связи между $NDVI$ и количеством стволов на отдельных участках леса; получена формула модельной связи между $NDVI$ и произведением таких аллометрических показателей как высота дерева и диаметр кроны.

Ключевые слова: аллометрические показатели, дистанционное зондирование, спутниковые изображения, георектификация, калибровка данных, вегетационные индексы, регрессионные уравнения, надземная биомасса, лес Идарвальд, Рейнланд-Пфальц.

Y. G. Danilov¹, Tabriz Mubariz oglu Tahmazov²

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

² National Aerospace Agency of the Republic of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: dan57sakha@mail.ru

e-mail: thmzov.tbriez66@gmail.com

ON THE POSSIBILITY OF DETERMINING ALLOMETRIC INDICATORS OF TREES USING SATELLITE REMOTE SENSING DATA

Abstract. In recent decades, the rapid development of remote sensing technologies has led to the development of various methods for determining the amount of aboveground biomass from satellite images. Regression equations were constructed linking field estimates of aboveground biomass and vegetation indices obtained by remote sensing methods. Such studies make it possible not only to promptly monitor the state of vast forests, but also to solve the problem of assessing global carbon stocks on the planet. The purpose of the study is to create the foundations for the development of new methods for determining allometric indicators by remote sensing methods. The objectives of the study are to determine using remote sensing technologies (1) the total mass of trees of a forest consisting of n number of plots differing from each other in the number and type of trees; (2) the total mass of a heterogeneous forest in which there is a certain functional relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and the number of trunks in a certain area; (3) the model relationship between NDVI and such allometric indicators as tree height (H) and crown diameter (CD). Research results: some problems of allometric measurements using remote sensing methods have been solved. A formula has been obtained for calculating the biological mass of trees in the forest using the values of the NDVI in individual forest areas; a similar problem for the case of a functional relationship between NDVI and the number of trunks in individual forest areas; the formula of the model relationship between NDVI and the product of such allometric indicators as tree height and crown diameter is obtained.

Keywords: allometric indicators, remote sensing, satellite images, georectification, data calibration, vegetation indices, regression equations, aboveground biomass, Idarwald forest, Rhineland-Palatinate.

Введение

Согласно [1], точная оценка надземной биомассы важна для изучения глобального углеродного цикла и может быть реализована с использованием спектральной и структурной информации относящейся кроны деревьев, получаемой методами дистанционного зондирования. В последние десятилетия быстрое развитие технологий дистанционного зондирования привело к разработке различных методов по определению количества надземной биомассы по спутниковым изображениям. Были построены регрессионные уравнения связывающие полевые оценки надземной биомассы и вегетационные индексы, полученные методами дистанционного зондирования, такими как NDVI [2, 3]. Вместе с тем, точность таких оценок не выше 10 %, что связано с неопределенностью, вызванной приближительностью результатов дистанционных методов измерения. В работе [4] отмечается, что одним из важных показателей древостоя является количество стволов, имеющихся в древостое, в расчете на один гектар.

Общая характеристика района исследования

Несколько подробно остановимся на исследованиях, проведенных на экспериментальном участке леса Идарвальд (49,85° с.ш., 7,15° в.д.), расположенном на северо-западных склонах низкогогорного хребта Хунсрюк (Рейнланд-Пфальц, Германия). Вблизи хребта типичны бедные песчаные и маломощные почвы, развитые на девонских кварцитовых породах. В нижних частях склонов солифлюкция глинистых продуктов выветривания палеогенового периода привела к образованию уплотненных и частично водоупорных толщ с насаждениями березы пушистой. В остальных частях исследуемого района с водопроницаемыми почвами исходными естественными лесными сообществами были разновидности лузуло-фаготум тем не менее, ель обычная

(европейская) стала доминирующей в лесоводстве с конца 18 века. Таким образом, доля обычной ели во всех древесных породах района Идарвальд по-прежнему фактически остается самой высокой, хотя в конце 80-х годов начался постепенный переход к смешанным лесам. Общая площадь Идарвальда составляет около 7500 га. Для анализа были выбраны два лесничества (Хинзерат, Бишофедрон) площадью около 1773 га. В этих районах встречаются однородные насаждения одного вида и возрастного класса, а также разнородные смешанные насаждения с посадкой или естественным возобновлением. Данные инвентаризации леса были интегрированы в подход к классификации, поскольку они позволяют извлекать обучающие данные, а также проверять результаты классификации.

Обработка и классификация данных

С этой целью управление лесным хозяйством земли Рейнланд-Пфальц предоставило официальные данные инвентаризации (конец периода сбора – октябрь 1994 г.). Эти данные изначально были включены в некоторые иерархически упорядоченные файлы данных, предоставляющие информацию о лесном районе, отдельных лесных насаждениях и соответствующих породах деревьев. После некоторого редактирования для статистической агрегации данных они были интегрированы в цифровую лесную ГИС и связаны с векторными данными (полигоны насаждений), оцифрованными с официальной карты лесничества. Кроме того, цветные инфракрасные аэрофотоснимки полета, проведенного 4 августа 1990 г., были доступны в Исследовательском институте лесной экологии и лесного хозяйства (FAWF) земли Рейнланд-Пфальц. Фотографии были отсканированы и ортотрансформированы, и, поскольку их масштаб (1:11000) позволяет выделить отдельные деревья, кроны были подсчитаны в вертикальном положении для подтверждения оценок на основе LSMA по данным TM Landsat-5. В этом исследовании для анализа была выбрана одна сцена TM Landsat-5, покрывающая район Hunsrück (траектория Landsat-5: 196; ряд: 25) примерно в то время, когда были получены данные цветных инфракрасных аэрофотоснимков полета (15.07.1990). Landsat-5 TM предоставляет мультиспектральные данные отражения в спектральных областях видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазонов, и поэтому подходит для изучения характеристик растительности. Набор данных был откалиброван путем преобразования исходных цифровых чисел в абсолютные значения коэффициента отражения для каждого пикселя. Поскольку рельеф изучаемой территории очень пересеченный, перед анализом структуры леса важно устранить топографические эффекты. Ключевым фактором в топографической коррекции является правильная попиксельная оценка общей освещенности (прямого и рассеянного членов), что невозможно с помощью типичных «автономных» подходов к коррекции.

В связи с этим, было решено использовать интегрированный подход комбинированной атмосферной и топографической коррекции, где условия, описывающие освещенность, могут быть аппроксимированы и скомпенсированы для каждой растровой ячейки путем интеграции цифровой модели рельефа. В дополнение к радиометрической коррекции предварительная обработка данных включала точную георектификацию, которая позволяет проводить многослойный анализ, сочетающий, например, данные изображений Landsat-5 TM и векторные данные FIS. 2.3.2 Подход к мультиспектральной классификации (в целом подходы к классификации) направлен на создание тематической карты на основе мультиспектральных спутниковых изображений. Они основаны на том принципе, что разные объекты или типы земного покрова обладают типичными свойствами отражения, которые в лучшем случае четко различимы в мультиспектральном пространстве признаков. Таким образом, реальный уровень детализации построенной тематической карты зависит от конкретной разделимости соответствующих категорий, которыми в данном исследовании являются типы леса или классы леса. Тематическая классификация включает в себя несколько этапов анализа данных. После дополнительной предварительной обработки для преобразования исходных данных в абсолютные значения коэффициента отражения (калибровка данных, 2.3.1) из данных изображения извлекаются обучающие

выборки, представляющие различные типы леса, и проверяются на разделимость с помощью сигнатурного анализа. Для классификации Идарвальда этот отбор был основан на данных FIS, и только однородные насаждения (т.е. насаждения, состоящие более чем на 90 % из одного вида) использовались для контролируемого (на основе априорных знаний) определения обучающих выборок. После этого репрезентативные, а также статистически отличающиеся выборки, используются для обучения классификатора. Для мультиспектральных данных дистанционного зондирования подход максимального правдоподобия является широко используемым методом классификации. В этом подходе для каждого класса предполагается гауссово распределение вероятностей, а средние векторы и ковариационные матрицы рассчитываются на основе выбранных обучающих данных для описания свойств отдельных классов. После этого каждый пиксель может быть помечен, тогда как присвоение класса зависит от наибольшей вероятности принадлежности. Этот стандартный параметрический подход был применен к данным Landsat-5 TM за 1990 г., и для проверки была рассчитана подробная матрица ошибок. Согласно [4], использование метода анализа линейной смеси спектров (LSMA) позволило более точно определить количество стволов в древостое, в расчете на один гектар, на восьми типичных лесных участках Германии, с использованием радиометрически скорректированных снимков Landsat-5 TM. Некоторые результаты по определению спектральной чувствительности, полученные путем проведения измерений на 42 древостоях приведены в таблице.

Таблица – Некоторые результаты работы [1]

Индекс	Модель оценки
$NDVI$	$SN = \exp(8,5456 \times NDVI - 0,3268)$
$NDVI$	$SN = \exp(5,6225 \times NDVI + 4,006)$

С учетом вышеизложенного, рассмотрим модельную задачу определения суммарной массы деревьев леса, состоящего из числа участков, отличающихся друг-от друга двумя показателями:

- Количество деревьев на участках различно;
- Типы деревьев на участках различны.

В общем случае суммарную массу деревьев в таком лесу можно вычислить по формуле

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (SN_i) \cdot (DWB_i) \quad (1)$$

где: SN_i – количество стволов на i -м участке или древостое; DWB_i – надземная биомасса в одном дереве в сухом виде.

Согласно [5], регрессионная зависимость DWB от $NDVI$ имеет вид

$$DWB = \alpha_1 \cdot \exp(\beta_1 \cdot NDVI) \quad (2)$$

Таким образом, с учетом выражений (1), (2) а также выражения, указанного на первой строке табл. 1. получим

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n [\exp(c_i NDVI_i - c_i)] \cdot [\alpha_i \exp(\beta_i NDVI_i)] \quad (3)$$

где $c_1, c_2, \alpha_1, \beta_1$ – регрессионные коэффициенты.

Выражение (3) перепишем в виде

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\exp(c_i NDVI_i - c_i)}{\exp c_i} \right] \alpha_i = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\exp(NDVI_i)(c_i + \beta_i)}{\exp c_i} \right] \alpha_i \quad (4)$$

В случае гомогенного леса из (4) получим

$$M_{\Sigma} = \frac{\alpha N \cdot \exp[NDVI(c + \beta)]}{\exp c} \quad (5)$$

Таким образом, если лес гомогенный и может быть разделен на N количество однотипных участков, то суммарная масса деревьев может быть вычислена по выражению (5).

Теперь рассмотрим вторую модельную задачу по оценке суммарной массы гетерогенного леса, в котором существует определенная функциональная связь между $NDVI_i$ и SN_i для i -го участка лесов виде

$$NDVI_i = NDVI_i(SN_i) \quad (6)$$

С учетом (1), (2) и (6) напомним

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (SN_i) \alpha_i \cdot \exp[\beta_i NDVI_i(SN_i)] \quad (7)$$

Задача исследования формулируется следующим образом: при наличии ограничительного условия типа

$$\sum_{i=1}^n NDVI_i(SN_i) = C; \quad C = const \quad (8)$$

Следует определить минимально возможную массу деревьев лесу. При этом допускаем, что лес может быть разделен на участки, количество деревьев в которых (SN_i) составляет упорядоченное множество в виде

$$SN = \{SN_i\}; \quad i = \overline{1, n} \quad (9)$$

где $SN_i = SN_{i-1} + \Delta SN$; $\Delta SN = const$ $SN_0 = 0$.

С учетом (9), дискретные модели (7), (8) условно можно записать в непрерывной форме.

$$M_{\Sigma} = \int_0^{SN_{max}} (SN) \cdot \alpha \cdot \exp[\beta \cdot NDVI(SN)] dSN \quad (10)$$

$$\int_0^{SN_{max}} NDVI(SN) dSN = C \quad (11)$$

С учетом (10) и (11) составим вариационную задачу вычисления оптимальной функции в которой, при условии (11) достигнет минимальной величины.

Целевой функционал задачи оптимизации имеет вид:

$$M_0 = \int_0^{SN_{max}} (SN) \cdot \alpha \cdot \exp[\beta \cdot NDVI(SN)] dSN - \lambda \left[\int_0^{SN_{max}} NDVI(SN) dSN - C \right] \quad (12)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Решение данной задачи согласно [6] должна удовлетворять условию

$$\frac{d\{SN\alpha \cdot \exp[\beta \cdot NDVI(SN)] + \lambda NDVI(SN)\}}{dNDVI(SN)} = 0 \quad (13)$$

Из (13) получим

$$SN \cdot \alpha \cdot \exp[\beta \cdot NDVI(SN)] \cdot \beta = \lambda \quad (14)$$

Из (14) имеем

$$NDVI(SN) = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{\lambda}{SN \cdot \alpha \cdot \beta} \right] \quad (15)$$

Таким образом, при обратной логарифмической зависимости $NDVI$ от SN M_0 достигает экстремального значения. При этом данный экстремум является минимумом, т.к. вторая производная интегранта в (12) по $NDVI(SN)$ оказывается всегда положительной величиной. Что касается величины λ , то она легко может быть вычислена с помощью выражений (11) с учетом выражения (15) при условии $\lambda = const$.

Следующей задачей исследования в настоящей статье является определение модельной связи между $NDVI$ и такими аллометрическими показателями как высота дерева (H) и диаметр кроны (CD). Как отмечается в работе [7], по результатам аллометрических измерений, проведенных с помощью лидара, установленного на БПЛА была получено следующее модельное уравнение

$$\ln(AGB) = \alpha + \beta \ln(H \cdot CD) \quad (16)$$

где: AGB – биомасса надземной части дерева в кг; H – высота дерева в м; CD – диаметр кроны в м; α и β – модельные коэффициенты, определяемые для каждого типа дерева.

Если допустить равенство

$$AGB = k \cdot DWB; \quad k = const \quad (17)$$

то с учетом (2), (16), (17) получим

$$\ln[k \cdot \alpha_1 \exp(\beta_1 \cdot NDVI)] = \alpha + \beta \ln(H \cdot CD) \quad (18)$$

Из (18) имеем

$$\ln k \cdot \alpha_1 + \beta_1 \cdot NDVI = \alpha + \beta \ln(H \cdot CD) \quad (19)$$

Из (19) находим

$$\ln(H \cdot CD) = \frac{\beta_1 \cdot NDVI + \ln k \cdot \alpha_1 - \alpha}{\beta} \quad (20)$$

или

$$H \cdot CD = \exp \left[\frac{\beta_1 \cdot NDVI + \ln k \cdot \alpha_1 - \alpha}{\beta} \right] \quad (21)$$

Таким образом, формула (21) определяет модельную связь между и произведением аллометрических показателей.

Заключение

Сформулированы и решены некоторые задачи аллометрических измерений с применением техники дистанционного зондирования. В частности, получена формула для вычисления массы деревьев в лесу с использованием данных величине на отдельных участках леса; аналогичная задача для случая наличия функциональной связи между и количеством стволов на отдельных участках леса; получена формула модельной связи между и такими аллометрическими показателями как высота дерева и диаметр кроны.

Литература

1. Yang, Q. Allometry-based estimation of forest aboveground biomass combining LIDAR canopy height attributes and optical spectral indexes / Q. Yang, Y. Sun, T. Hu, S. Jin, X. Liu, C. Niu, Z. Liu, M. Kelly, J. Wei, Q. Guo // *Forest Ecosystems*. Vol. 9. 2022.
2. Pandey, P.C. Forest biomass estimation using remote sensing and field inventory: a case study of Tripura, India / P.C. Pandey, P.K. Srivastava, T. Chetri, B.K. Choudhary, P. Kumar // *Environ. Monit. Assess.* 191 (9), 2019. – P. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7730-7>.
3. Pang, Y. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years / Y. Pang, A. F. Rahman, G. Sun, W. Yuan, L. Zhang, X. Zhang // *Rem. Sens. Environ.* 233. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111383>.
4. Vohland, M. Remote sensing techniques for forest parameter assessment: multispectral classification and linear spectral mixture analysis / M. Vohland, J. Stoffels, C. Hau, G. Schuler // *Silva Fennica*, 2007. – 41(3). – P. 441-456.
5. Wu, J. Developing general equations for urban tree biomass estimation with high-resolution satellite imagery / J. Wu // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. 4347.
6. Эльсгольц, Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Е. Эльсгольц. – М.: Наука. 1974. – С. 472.
7. Brede, B. Non-destructive estimation of individual tree biomass: allometric models, terrestrial and UAV laser scanning / B. Brede, L. Terryn, N. Barbier, H. M. Bartholomeus, R. Bartolo [and others] // *Remote Sens. Environ.* Vol. 280. 2022.

References

1. Yang, Q. Allometry-based estimation of forest aboveground biomass combining LIDAR canopy height attributes and optical spectral indexes / Q. Yang, Y. Sun, T. Hu, S. Jin, X. Liu, C. Niu, Z. Liu, M. Kelly, J. Wei, Q. Guo // *Forest Ecosystems*. Vol. 9. 2022.
2. Pandey, P.C. Forest biomass estimation using remote sensing and field inventory: a case study of Tripura, India / P.C. Pandey, P.K. Srivastava, T. Chetri, B.K. Choudhary, P. Kumar // *Environ. Monit. Assess.* 191 (9), 2019. – P. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7730-7>.
3. Pang, Y. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years / Y. Pang, A. F. Rahman, G. Sun, W. Yuan, L. Zhang, X. Zhang // *Rem. Sens. Environ.* 233. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111383>.
4. Vohland, M. Remote sensing techniques for forest parameter assessment: multispectral classification and linear spectral mixture analysis / M. Vohland, J. Stoffels, C. Hau, G. Schuler // *Silva Fennica*, 2007. – 41(3). – P. 441-456.
5. Wu, J. Developing general equations for urban tree biomass estimation with high-resolution satellite imagery / J. Wu // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. 4347.
6. Эльсгольц, Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Е. Эльсгольц. – М.: Наука. 1974. – С. 472.
7. Brede, B. Non-destructive estimation of individual tree biomass: allometric models, terrestrial and UAV laser scanning / B. Brede, L. Terryn, N. Barbier, H. M. Bartholomeus, R. Bartolo [and others] // *Remote Sens. Environ.* Vol. 280. 2022.

Сведения об авторах

ДАНИЛОВ Юрий Георгиевич – к.г.н., заместитель ректора СВФУ по вопросам устойчивого развития арктических территорий, профессор эколого-географического отделения ИЕН СВФУ, доцент, e-mail: dan57sakha@mail.ru

DANILOV Yuri Georgievich – Candidate of Geographical Sciences, Deputy Rector for Sustainable Development of the Arctic Territories, Associate Professor, Institute of Natural Sciences, Ammosov North-Eastern Federal University. Yakutsk, Russian Federation, e-mail: dan57sakha@mail.ru

ТАХМАЗОВ Табриз Мубариз оглы – докторант Национального аэрокосмического агентства Республики Азербайджан, e-mail: thmzov.tbriez66@gmail.com

ТАНМАЗОВ Tabriz Mubariz oglu – PhD student, National Aerospace Agency of the Republic of Azerbaijan, e-mail: thmzov.tbriez66@gmail.com

*В. Н. Коротаев¹, О. А. Поморцев²*¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москвы, Россия² Северо-Восточный Федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия

e-mail: vlaskor@mail.ru

e-mail: olegpomortsev@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОБЕРЕЖИЙ ЧУКОТКИ И КОРЯКСКОГО НАГОРЬЯ

Аннотация. Многолетние экспедиционные исследования Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова арктического побережья России (1969–2015 гг.) дали обширный материал по гидрологии, русловой морфодинамике и геоморфологии устьевых областях крупных рек от Северной Двины до Колымы. Совместные работы МГУ и Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова позволили значительно расширить географию исследований до побережий Чукотского и Берингово моря. На основании анализа геолого-геоморфологических данных и массива опубликованных и архивных материалов удалось установить закономерности и специфические особенности береговых и устьевых процессов в заключительную фазу стабилизации постледниковой трансгрессии океана. За последние 7–5 тыс. лет произошло подтопление низменных холмистых прибрежных равнин, речных долин и фиордов. Активное воздействие волновой деятельности моря привело к размыву верхней части подводного склона, перестройке его профиля и отступанию аккумулятивных форм в сторону суши и создание современных очертаний береговой линии. Выдвинутые в море участки побережья, сложенные толщей рыхлых четвертичных отложений, были частично размывы волнами, а наносы вовлекались в продольное и поперечное перемещения, формируя косы и пересыпи, что привело к общему выравниванию береговой линии. В настоящее время в условиях подъема уровня Мирового океана общая тенденция к перестройке подводного склона и береговой зоны сохраняется и может быть крайне опасна для побережий, сложенных сильно льдистыми песчано-суглинистыми аллювиально-озерными отложениями. Дальнейшее повышение глобальной температуры существенно смягчит климат арктических побережий, вызовет деградацию мерзлоты, протаивание подземных льдов и ускорит процесс отступления береговых абразионных уступов, морского края речных дельт. Учитывая региональные геолого-геоморфологические особенности побережий Чукотского и Берингово моря, следует ожидать, что возможный подъем уровня моря приведет к протаиванию и деградации многолетнемерзлых пород и жильных льдов.

Ключевые слова: побережье, устьевая система, дельта, береговой бар, лагуна, фиорд.

*V. N. Korotaev¹, O. A. Pomortsev²*¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia² M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia;

e-mail: vlaskor@mail.ru

e-mail: olegpomortsev@mail.ru

FEATURES OF THE FORMATION OF THE COASTS OF CHUKOTKA AND THE KORYAK HIGHLANDS

Abstract. Long-term expeditionary studies of the Geography Faculty of Lomonosov Moscow State University of the Arctic coast of Russia (1969 – 2015) have provided extensive material on hydrology, channel morphodynamics and geomorphology of the estuaries of large rivers from the Northern Dvina to the Kolyma. The joint work of the Moscow State University and the M. K. Ammosov North-Eastern Federal University made it possible to significantly expand the geography of research to the coasts of the Chukchi and Bering Seas. Based on the analysis of geological and geomorphological data and an array of published and archival materials, it was possible to establish patterns and specific features of coastal and estuarine processes in the final phase of stabilization of the post-glacial ocean transgression. Over the past 7-5 thousand years, flooding of low-lying hilly

coastal plains, river valleys and fjords has occurred. The active impact of the wave activity of the sea led to the erosion of the upper part of the underwater slope, the restructuring of its profile and the retreat of accumulative forms towards the land and the creation of modern outlines of the coastline. The sections of the coast extended into the sea, composed by a thickness of loose quaternary sediments, were partially eroded by waves, and sediments were involved in longitudinal and transverse movements, forming braids and embankments, which led to a general alignment of the coastline. Currently, in conditions of rising sea levels, the general trend towards the restructuring of the underwater slope and the coastal zone persists and can be extremely dangerous for coasts composed of strongly icy sandy-loamy alluvial-lacustrine deposits. A further increase in global temperature will significantly soften the climate of the Arctic coasts, cause the degradation of permafrost, thawing of underground ice and accelerate the process of retreat of coastal abrasion ledges, the sea edge of river deltas. Taking into account the regional geological and geomorphological features of the coasts of the Chukchi and Bering Seas, it should be expected that a possible rise in sea level will lead to thawing and degradation of permafrost rocks and vein ice.

Keywords: coast, estuarine system, delta, coastal bar, lagoon, fiord

Введение

Под *Чукоткой* понимается часть территории Российской Федерации, входящая в Чукотский автономный округ общей площадью 721,5 тыс. км² и расположенная на крайнем северо-востоке России. Граничит с Якутией (Саха) на северо-западе (от мыса Медвежий на побережье Восточно-Сибирского моря вдоль правобережья Нижней Колымы и Омолона), Магаданской областью на юго-западе (в районе хребта Уш-Урэкчэн) и бывшим Корякским округом Камчатского края на юге (в районе хребтов Ичигемский, Пенжинский и Пикась). Омывается Восточно-Сибирским и Чукотским морями Северного Ледовитого океана и Беринговым морем Тихого океана. Крайняя



Рис. 1. Схема района исследований

Fig. 1. Scheme of the research area

северо-восточная часть Чукотки между Чукотским морем, проливом Беринга и Анадырским заливом носит название Чукотского полуострова. Побережье *Корякского нагорья* располагается в пределах бывшего Корякского округа от бухты Дежнева до полуострова Говена и омывается Беринговым морем и водами Олюторского залива (рис. 1)

Природные ресурсы и уникальное географическое положение на территории древней Берингии издавна привлекало внимание ученых различных научных направлений, однако до настоящего времени для этого края не выработана единая научно обоснованная стратегия рационального природопользования.

При написании статьи использованы результаты полевых и камеральных геологических, геоморфологических, русловых, гидроакустических и гидрографических изысканий Географического факультета МГУ и Северо-Восточного федерального университета, а также опубликованные работы и массив архивных данных. На основе анализа топографических карт 1:200 000 масштаба и космических снимков *Landsat 7* и копии с сайта *Google Планета Земля* были составлены 32 геоморфологические карты устьевых и береговых систем побережий Чукотки и Корякского нагорья [1].

Геологическое строение и рельеф

Чукотка – горная страна со средневысотным (до 1000 м) и низкогорным (до 500 м) эрозионно-денудационным рельефом, представленным Анюйским нагорьем в центральной части и Анадырским плоскогорьем, и Чукотским нагорьем на востоке. Высшей точкой является гора Безымянная в Чанталском хребте – 1887 м. Здесь широко развиты формы горного оледенения, разнообразные криогенные образования с преобладанием солифлюкционных и гольцовых форм. Низменности распространены в прибрежных районах на севере Чукотки (Чаунская и Ванкаремская), на востоке (Анадырская) и в центральной части округа – Паратольско-Бельская низменность. На этих территориях широко распространены термокарстовые процессы с образованием бугров пучения, байджерахов и термокарстовых озер [2, 3, 4].

Формирование структурно-тектонического плана Чукотки продолжалось более 500 млн лет, в течение которых ее территория претерпела каледонскую, герцинскую и альпийскую эпохи орогенеза. Широкое распространение магматических пород обусловлено активным проявлением интрузивных и вулканических процессов в течение мела, палеогена и неогена. Большая часть рыхлых отложений накопилась в четвертичное время в тектонических депрессиях и на приморских низменностях.

Наиболее крупными структурными элементами Чукотки являются Верхояно-Чукотская область мезозойской складчатости, Эскимосский докембрийский массив, Охотско-Чукотский мезозойский вулканический пояс и Корякско-Камчатская область мезозойской и кайнозойской складчатости. За это время в пределах Восточно-Чукотского массива накопились метаморфические и осадочные образования от архея до карбона. В центральной части территории Чукотки распространены геосинклинальные отложения верхней перми, триаса и нижнего мела, а на юге и юго-западе – меловые вулканы Охотско-Чукотского вулканического пояса.

Выделяются три группы морфоструктур: к первой относятся горные сооружения, возникшие на складчатом основании и представленные альпинотипными хребтами и глыбовыми нагорьями; вторая группа морфоструктур включает равнины, сформированные в различных структурных зонах. В третью группу входят морфоструктуры с плоскогорным рельефом на дорифейских массивах. Наиболее молодыми морфоструктурами являются антиклинали, синклинали и межгорные впадины Корякско-Камчатской складчатой области. Вулканогенные Охотско-Камчатские морфоструктуры связаны с формированием притихоокеанских вулканогенных поясов, обрамляющих впадину Тихого океана.

В приморских равнинах и межгорных впадинах широко развиты кайнозойские ледниково-морские осадки (например, средне- и верхнечетвертичные песчаные и галечниковые отложения вдоль побережья Колочинской губы и залива Креста). Голоценовые морские отложения

представлены песками кос, пляжей и низких террас. На территории Чукотки также широко распространены интрузивные и вулканогенные образования от архея и триаса до юры и позднего мела мощностью до нескольких километров. Извержения вулканов сопровождались выбросом миллионов тонн пепла, шлаков и лав, которые заливали огромные пространства, образуя вулканические плато.

В целом, рельеф Чукотки можно считать низкогорным с альпинотипными формами, сохраняющий следы средне- и позднечетвертичного оледенений в виде холмисто-западинного и грядово-холмистого рельефа из конечных, стадийных и боковых морен и камов, а также флювиогляциальных террас. Гидрографическая сеть представлена водотоками I–III порядков с каньоно- или трогообразными долинами. Флювиальный рельеф представлен низкой и высокой поймами и тремя надпойменными террасами высотой 4, 10–12 и 25–30 м. На низменных побережьях Чукотки развиты морские аккумулятивные формы в виде четырех террас: современная (1–2 м), позднеголоценовая (3–5 м), позднелейстоценовая (25–30 м) и среднеплейстоценовая (50–60 м). Современные морские аккумулятивные формы представлены ваттами, маршами, пляжами, пересыпями, косами и береговыми валами [5].

Типы берегов

Описание типов берегов северо-восточных морей России базируется на известной генетической классификации морских берегов О.К. Леонтьева [6] которая учитывает степень воздействия главного берегоформирующего фактора – морского волнения – на переработку морем края прибрежной суши. Согласно этой классификации, берега выстраиваются в определенную генетическую последовательность от неизмененных и слабо измененных морем берегов до созданных морскими процессами. В первую категорию входят берега с ледниково-тектоническим расчленением (фиордовые и шхерные), с эрозионно-тектоническим расчленением, тектонически обусловленные (сбросовые). Категория преобразованных морем берегов подразделяется на три группы: 1) абразионные берега с несколькими разновидностями (абразионно-денудационные, собственно абразионные, эрозионные отмершие, термоабразионные и ледовые); 2) абразионно-аккумулятивные берега; 3) аккумулятивные берега представлены несколькими разновидностями: созданные волновыми процессами (пляжевые и лагунные), созданные приливными и стонно-нагонными процессами (осушные, марши и ватты) и созданные устьевыми процессами (дельтовые). Картирование разных типов берегов, их распространения и соотношения в пределах каждого моря позволяет определить характер морских берегов и их современное состояние [7, 8].

Восточно – Сибирское море. Самое мелководное из всех северных морей России. Это способствовало развитию широких ветровых осушек, особенно в западной половине моря. Восточное побережье моря более высокое. Восточнее устья р. Колымы, от мыса Медвежий (Тонкий) до Мал. Чаунского пролива располагается относительно выровненное побережье, состоящее из чередующихся высоких (от 20 до 100 м) скалистых абразионных (мысы Каменный, Летяткин и Бол. Баранов) и низких (10–20 м) термоабразионных клифов и бухтовых аккумулятивных участков с пляжами и ветровыми осушками. Впадающие здесь малые реки характеризуются либо эстуариями (р. Кейнгывеем), либо блокированными устьями (рр. Кытепвеем, Милькера, Раучуа). Северное террасированное побережье о. Айон, расположенного у входа в Чаунскую губу, представлено низким термоабразионным берегом, окаймленным осушкой шириной до 2 км и прикрытым бугристыми эоловыми песками высотой 1–3 м. В настоящее время осушка окаймлена узкой песчаной косой, за которой располагается мелководная лагуна.

На западном побережье Чаунской губы в основном развиты низкие термоабразионные берега (кроме мыса Горбатый, где к берегу подходит гора высотой 871 м). Южное побережье Чаунской губы представлено низменной террасированной озерно-аллювиальной криогенной равниной (едома), где в губу впадают реки Лелювеем, Пучъэвеем, Чаун и Палаяваам, формирующие эстуарии. Берег выровненный аккумулятивный, окаймленный ветровой осушкой. На восточном побережье Чаунской губы располагаются как низкие выровненные аккумулятивные

берега с блокированными устьями рек (рр. Тэюкууль, Млелин), так и высокие абразионные берега (п-ов Певек), сложенные коренными породами (меловыми и интрузивными).

От пролива Певек до мыса Шелагского и далее до о. Шелаурова, где к побережью Восточно – Сибирского моря подходят отроги Чукотского нагорья, берег становится неровным, высоким, в основном абразионным, выработанным в коренных породах, за исключением аккумулятивных лагунных участков в районе пос. Апателгино и в устье р. Бол. и Мал. Ергывеем. Далее на восток от пролива Нольде до мыса Биллингса развит преимущественно низкий лагунный берег с устьями рек Вэвеем, Кэвеем, Пегтымель, Кууль-Иннукейи, Кэйкууль и Ыкваваамкай и небольшим участком абразионно-аккумулятивного берега между мысами Шалаурова Изба и Вевман. Весьма интересной аккумулятивной формой этого района является сложная пересыпь м. Биллингса, отделяющая лагуну Валькакиманку. Происхождение этого комплекса до сих пор вызывает разночтения: некоторые исследователи утверждают, что это генетически коса, другие – двойной или одиночный бар с останцом едомы в тыловой части [9].

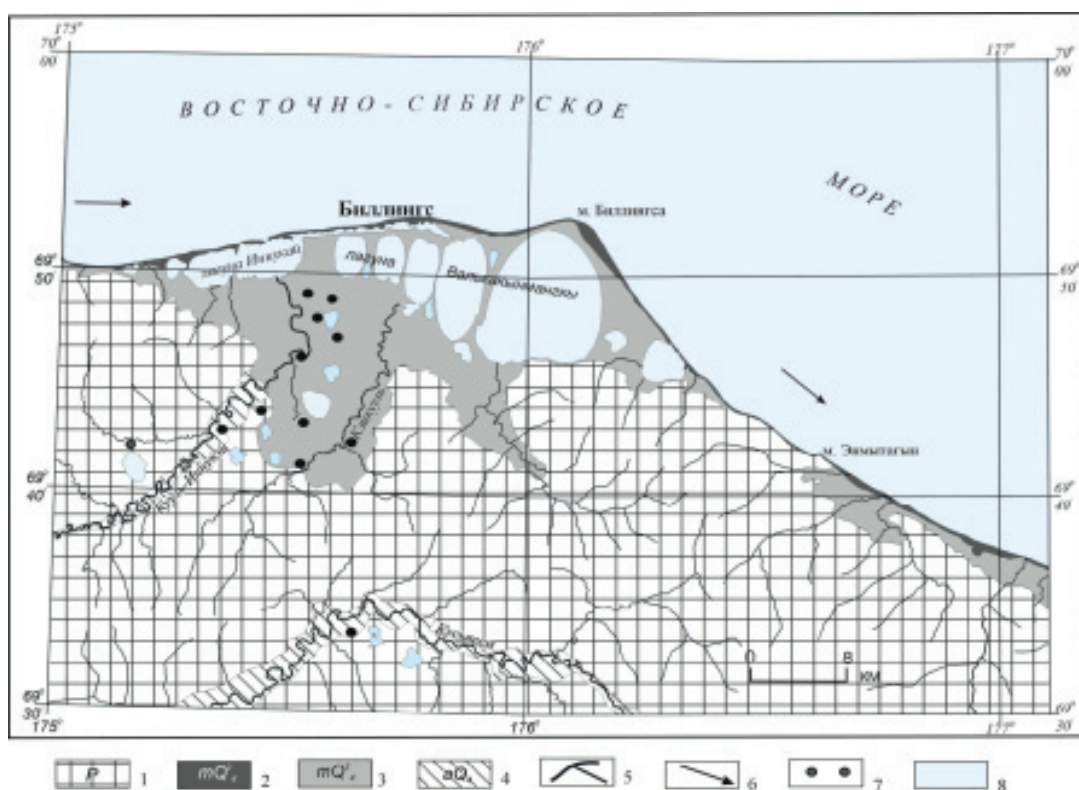


Рис. 2. Лагунное побережье (мыс Биллингса)

1 – эрозионно-денудационный рельеф холмистых предгорий (до 500 м), 2 – современная морская терраса, 3 – морская голоценовая терраса, 4 – пойменно-русловой рельеф речных долин, 5 – гидрографическая сеть, 6 – направление вдольбереговых потоков наносов, 7 – булгунняхи, 8 – водные объекты

Fig. 2. Lagoon coast (Cape Billings)

1 – erosion-denudation relief of hilly foothills (up to 500 m), 2 – modern sea terrace, 3 – marine Holocene terrace, 4 – floodplain-channel relief of river valleys, 5 – hydrographic network, 6 – direction of long-shore sediment flows, 7 – bulgunniakhi, 8 – water bodies

Чукотское море. Для побережья Чукотского моря характерно широкое распространение различного типа лагун, возникших в результате погружения под уровень моря обширной и очень слабо наклоненной Приморской низменности, сложенной флювиогляциальными песчано-галечными отложениями. Многие лагуны занимают понижения доледникового рельефа,

сочетая морфологические признаки лагун и лиманов. В пределах российского побережья эти берега составляют более 49 % как в материковой части, так и на о. Врангеля. Основной процесс современной динамики берегов Чукотского моря – это перестройка и размыв приурезовой зоны подводного склона и образование мощных пересыпей за счет выбросов обломочного материала со дна.

От лагуны Валькакынмангкы до мыса Сердце-Камень формируется выровненный аккумулятивный лагунный берег с небольшими термоабразионными участками. Здесь нет далеко выдающихся в море мысов или глубоко врезанных в сушу заливов, за исключением района Колочинской губы длиной почти 100 км. Рельеф побережья разделяется на два типа: к морю подходит либо холмистая низменность, или отроги прибрежной горной гряды, сложенной сланцево-известняковым комплексом пород палеозоя и интрузиями гранитоидов. На участке берега от м. Якан на западе до о. Серых Гусей на входе в Колочинскую губу широко развиты береговые бары и отчленяемые ими лагуны длиной до 100 км, сложенные галькой и гравием. Некоторые лагуны наследуют подтопленные низовья рек и по своей конфигурации скорее являются лиманами, отчлененными от моря входными косами.

Берега Колочинской губы представлены невысокими термоабразионно-солифлюкционными обрывами. Вершинную часть губы занимают осушки. Генетически Колочинская губа является ингрессионным долинным заливом р. Ионивеем. От восточного входного мыса Колочинской губы, где формируется крупная аккумулятивная форма – коса Беляка, располагается небольшой залив Нэскынпильгин с низкими термоабразионными берегами.

Аккумулятивные пересыпи (высота 0,5–3,5 м, ширина от 0,1–0,3 до 1–1,5 км), отчленяющие от моря мелководные лагуны, протягиваются параллельно материковому берегу на сотни километров. Они сложены песком и гравийно-галечным материалом, который по своему составу более близок к породам внутренних частей материка, чем к породам соседних абразионных уступов [10]. Кроме того, абразионные участки имеют сравнительно небольшую протяженность и вряд ли могли поставлять в береговую зону достаточное количество обломочного материала. Эти обстоятельства дают основания предполагать, что источником поступления осадочного материала служат запасы аллювиальных и флювиогляциальных осадков на шельфе, вынесенных сюда водотоками ранее в процессе таяния горно-долинных ледников и затопленных в ходе голоценовой трансгрессии. Современные мелкие реки обычно впадают в лагуны, где и аккумулируется поставляемый ими осадочный материал. Следовательно, пересыпи Чукотского моря в большинстве своем являются барами, т.е. формами поперечного питания наносами. Однако вдольбереговое перемещение наносов также играет заметную роль в оформлении пересыпей как косы или бары-косы в устье Колочинской губы. Характерной особенностью многих чукотских баров является включение в их тело останцов прибрежной едомы, сложенных мерзлыми суглинистыми отложениями.

В зависимости от способа образования, на чукотском побережье выделяются разные типы лагун: шнурообразные (лагуны Кувэтильчин, Мааминпильгин), лагуны-заливы (Нэскынпильгин), лагуны-лиманы (Амгуема, Пынгопильгин) и др. Многие из них отличаются своеобразным внутренним расчленением на ряд округлых водоемов в результате формирования серии кос азовского типа под воздействием продольных волнений.

Размываемые берега играют в Чукотском море подчиненную роль, причем преобладающее значение среди них на материковом побережье имеют термоабразионные берега, а на о. Врангеля, где часты выходы прочных коренных пород, превалируют обычные абразионные берега. Термоабразия приурочена к участкам размыва края прибрежной аллювиально-флювиогляциальной или ледниково-морской равнины, сложенной глинистыми отложениями с разной степенью льдистости. Характерно, что и невысокие, но крутые материковые берега многих лагун и заливов также подвергаются отепляющему воздействию воды и атмосферы, что нередко приводит к развитию солифлюкционных процессов на береговых уступах. В этом случае у под-

ножья клифов формируются солифлюкционные шлейфы. Последние весьма характерны для единственной крупной бухты Чукотского моря – Колочинской губы, берега которой представлены невысокими термоабразионно-солифлюкционными обрывами. Генетически Колочинская губа является ингрессионным долинным заливом р. Ионивеем.

Выступающие в море многочисленные мысы (Шмидта, Дженретлен, Неттан, Онман, Сердце-Камень, Икигур, Инчовын, Дежнева) сложены обычно прочными коренными породами (главным образом, интрузивными массивами или палеозойскими песчаниками, известняками и сланцами). Интрузивные массивы (самые крупные Сердце-Камень и Дежнева) слабо поддаются волновому размыву. На таких абразионно-денудационных берегах большую роль играет морозное выветривание, способствующее растрескиванию и обрушению прочных пород. В районах выхода палеозойских осадочных пород процесс абразии более активен. Здесь формируются типичные абразионные берега с почти отвесными клифами большой высоты и с висячими устьями рек, которые свидетельствуют о том, что, подмыв клифов происходит быстрее, чем врезание водотоков [10]. Наиболее протяженные отрезки абразионных берегов прослеживаются между мысами Сердце-Камень и Дежнева, где в непосредственной близости от берега протягиваются отроги горных гряд. Между мысами Дежнева и Инчоуын расположена лагуна Уэлен, пересыпь которой сложена галькой. Мыс Дежнева, крайняя восточная точка полуострова Чукотки, сложен гранитами, кварцевыми и нефелиновыми сиенитами и поднимается над морем на высоту более 700 м. В целом, побережье Чукотского моря представляет собой самый крупный на берегах Северного Ледовитого океана регион лагунного побережья.

Берингов пролив. На восточной оконечности Чукотского полуострова между мысами Дежнева и Чукотским распространены следующие типы морских берегов: 1) денудационные, приуроченные к выходам интрузивных пород в виде жил и даек гранитов и сиенитов; 2) абразионные в местах распространения известняков или метаморфизованных сланцев; 3) абразионно-солифлюкционные, сложенные мерзлыми флювиогляциальными отложениями; 4) аккумулятивные выровненные лагунно-лиманские, представленные галечниковыми косами и пересыпями, отделяющие подтопленные участки речных долин от открытого моря.

Берингово море. Северо-западное побережье Берингова моря характеризуется значительным разнообразием генетических типов берегов. Характер их распределения во многом обусловлен тектонической активностью региона, неоднородностью слагающих побережье пород, высокой штормовой активностью моря. Последледниковая морская трансгрессия привела к ингрессионному затоплению обработанных ледником тектонических и эрозионно-тектонических долин и отрицательных форм аккумулятивного ледникового, преимущественно моренного, рельефа, что привело к образованию фиордовых берегов (рис. 3).

Восточное побережье Чукотского полуострова полностью гористое. Только в устьях рек и в тыловой части глубоко вдающихся в сушу заливов имеются пространства приморских низменностей. В целом, берег имеет первично расчлененный ингрессионный облик, который, однако, местами значительно изменен процессами волнового выравнивания контура берега. Характерной чертой этого побережья является присутствие большого массива фиордовых берегов (в южной половине этого побережья), сложенных андезитами, порфиритами и андезибазальтами. Борты фиордовых бухт, как правило, не изменены волновыми процессами и представляют собой обвально-осыпные склоны. Котловины фиордов переуглублены и отделены от равнин шельфа мелководными порогами, сложенными обычно моренным материалом. Входные мысы фиордов часто осложнены клифами. Из продуктов абразии мысов или древних морен формируются свободные береговые аккумулятивные формы типа двойных серповидных и петлевидных кос, часто перегораживающие фиорды в виде пересыпей, сложенных грубообломочным материалом. Менее широко развиты выровненные абразионные берега, обычно приуроченные к выходам осадочных толщ, а также выровненные абразионно-аккумулятивные берега, оконтуривающие приморские равнины [11. 12. 13. 14].

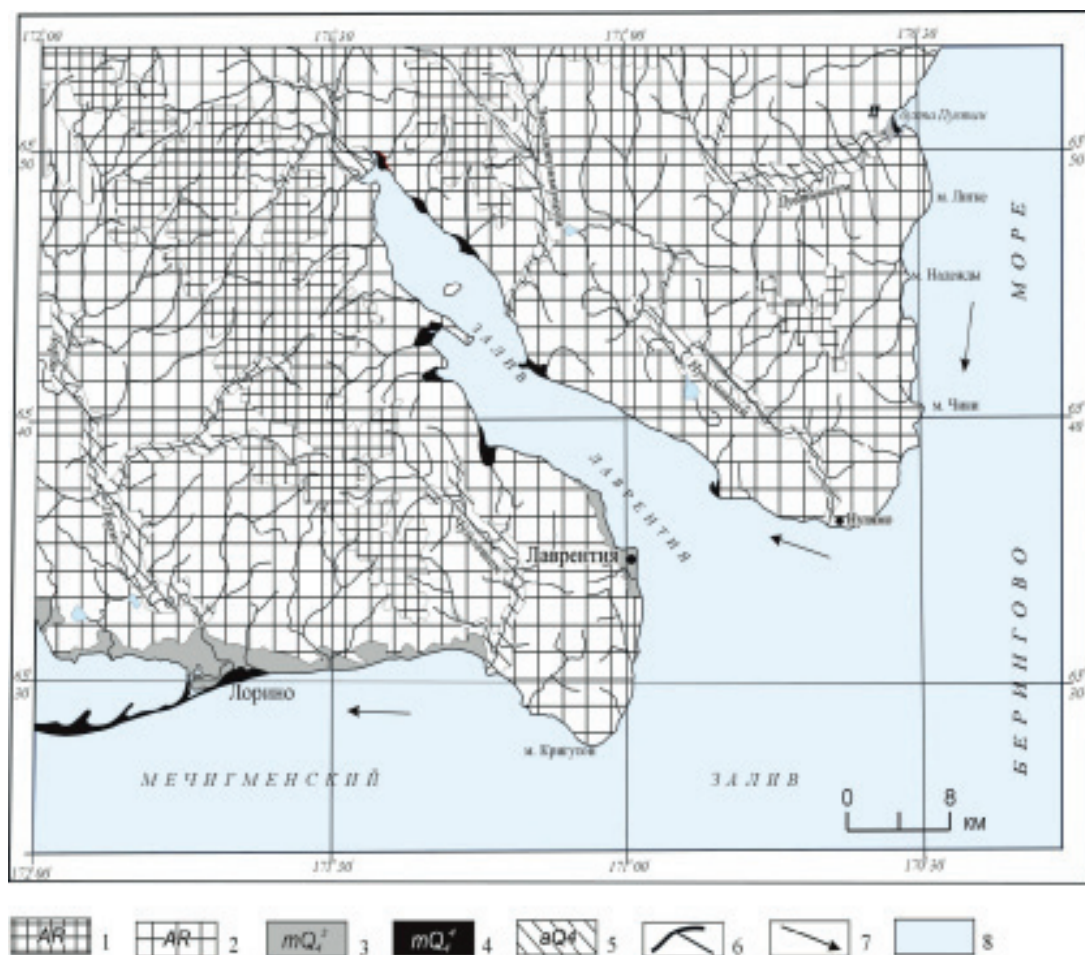


Рис. 3. Фиордовое побережье (залив Лаврентия)

1 – эрозионно-денудационный рельеф среднегорий со следами древнего оледенения (до 1000 м), 2 – эрозионно-денудационный рельеф холмистых предгорий (до 500 м), 3 – морская голоценовая терраса, 4 – современная морская терраса, 5 – пойменно-русловой рельеф речных долин, 6 – гидрографическая сеть, 7 – направление вдольбереговых потоков наносов, 8 – водные объекты

Fig. 3. Fiord coast (Gulf of Lawrence)

1 – erosion-denudation relief of the middle categories with traces of ancient glaciation (up to 1000 m), 2 – erosion-denudation relief of hilly foothills (up to 500 m), 3 – marine Holocene terrace, 4 – modern marine terrace, 5 – floodplain-channel relief of river valleys, 6 – hydrographic network, 7 – direction long-shore sediment flows, 8 – water bodies

Анадырский залив, расположенный между входными мысами Чукотский и Наварин, – самый крупный залив Берингова моря. Рельеф побережий залива в значительной степени сформировался под влиянием ледников четвертичного периода, с чем связано широкое распространение в прибрежной полосе рыхлых отложений, представленных самыми разнообразными фациями. Впадающие в залив реки протекают по долинам, наследующим тектонические разломы разработанным ледниками. В настоящее время решающую роль в формировании берегов Анадырского залива играют волновые процессы. На северных и северо-восточных берегах залива, куда подходят отроги Чукотского нагорья, преобладают абразионные и абразионно-аккумулятивные типы, выработанные в рыхлых отложениях. Незначительно выдвинутые в море мысы (Кытрыкай, Зеленый, Каменистый, Маленький, Поворотный, Низкий) сложены корен-

ными породами. В формировании береговых уступов вершинных частей залива значительную роль играют процессы солифлюкции и термоабразии. Песчано-глинистые четвертичные отложения, слагающие эти берега, обладают очень высокой степенью льдистости. Так, на восточном берегу залива Креста она достигает порядка 70–80 %, а на берегах Анадырского лимана до 90–97 %. К абразионной деятельности волн присоединяется и разрушительное влияние морских приливов, высота которых достигает здесь примерно 3 м. Обилие флювиогляциального материала на подводном склоне способствовало, особенно на юго-западном берегу залива, образованию многочисленных аккумулятивных форм разного типа (косы Земля Гека и Русская Кошка, отчленяющие Анадырский лиман, косы Рэткын, Оссорская, Карага и многие другие). Большая часть аккумулятивных форм сложена галечным материалом, но встречаются и песчаные образования [15].

Береговая линия длиной около 1300 км от мыса Наварин на северном побережье полуострова Чукотка до Чукотского мыса на северо-восточной оконечности залива имеет сложные очертания благодаря заливу Креста и Анадырскому лиману, глубоко вдающихся в сушу. От м. Чукотский до залива Креста к побережью выходят горные массивы Чукотского нагорья высотой 500–600 м. На этом относительно выровненном участке побережья преобладают абразионные берега, выработанные в рыхлых четвертичных валунно-суглинистых и глинистых отложениях с линзами жильного льда. Незначительно выдвинутые в море мысы (Кытрыкай, Зеленый, Каменистый, Маленький, Поворотный, Низкий) сложены коренными породами. Обломочный материал мигрирует здесь преимущественно в юго-западном направлении, формируя мощные аккумулятивные формы – косы Русская Кошка и Руддера, сложенные песчано-галечным материалом. Своеобразной аккумулятивной формой является береговой бар Мээчкын, протянувшийся с востока на запад от лагуны Чэутакан до залива Креста на расстоянии около 77 км. Песчано-галечный материал, поступающий в поперечном потоке со дна, вовлекается во вдольбереговое перемещение, способствуя росту этой аккумулятивной формы в длину.

Западное побережье Анадырского залива между мысами Поворотный и Беринговский представлено обширной, слегка всхолмленной Анадырской низменностью, сложенной рыхлыми четвертичными отложениями, в которых выработаны термоабразионные берега, осложненные процессами солифлюкции. Аккумулятивные формы образуются в виде кос на входных мысах Анадырского лимана, а также пересыпей в лагунах шириной до 1,5–2 км, сложенных песчано-галечниковым материалом (Кэингыпильгын, Южная, Тымна, Чимчинэйкуйым).

Побережье Анадырского залива на северо-восточной оконечности Корякского нагорья образует полуостров, восточная сторона которого сильно изрезана и представляет собой чередование выдвинутых в море абразионных мысов и широких открытых бухт (фиорды), превращенных в настоящее время в лагуны и лиманы песчано-галечниковыми пересыпями (Лахтина, Аринай, Амаам, Орианда).

Побережье *Берингово моря* между заливами Анадырский и Олюторский характеризуется сильной расчлененностью морских берегов. Правда, в северной его половине активно действуют процессы выравнивания берега. Выровненный или выравнивающийся абразионный берег известен, например, с южной стороны мыса Наварин. Однако, большее значение в выравнивании берега играют аккумулятивные волновые процессы. Характерное для этого побережья чередование выдвинутых в море абразионных мысов и широких открытых бухт (фиордов) нередко окаймлено песчано-галечниковыми пересыпями (Лахтина, Аринай, Амаам, Орианда), а фиорды в настоящее время превращены в лагуны и лиманы.

Юго-западнее устья реки Хатырка берег имеет мелко – зубчатое расчленение за счет развития здесь целой серии фиордов, выработанных в прочных осадочных породах Корякского нагорья (сланцы, песчаники и туфопесчаники) мелового и третичного возраста. Аналогичный отрезок фиордового побережья, значительно меньшей протяженности, располагается в тыловой части Олюторского залива, берега слабо изменены волновыми процессами.

Природные особенности формирования морских побережий

Современный облик побережий окраинных морей России, в том числе и Чукотки, сформировался за последние 30 тыс. лет в результате регрессивно-трансгрессивной стадии Мирового океана, когда его уровень сначала опустился на 100–80 м во время последнего (валдайского) оледенения, а затем поднялся до современного положения 6–5 тыс. лет назад в послеледниковые [16, 17]. Позднечетвертичное падение уровня моря (более 18 тыс. лет назад) привело к осушению дна практически всего океанического шельфа и многих окраинных морей и врезанию рек в континентальные и морские плейстоценовые отложения, заполнявших палеодолины. Реликты этой речной сети прослеживаются на подводном склоне окраинных морей в виде подводных долин и погребенных дельт [18, 19].

Приблизительно с 19–18 до 7–5 тыс. лет назад наступил этап послеледниковой трансгрессии, во время которой уровень Мирового океана поднимался со средней скоростью 0,6 см/год. Многие исследователи предполагают значительную неритмичность подъема уровня моря, когда в периоды замедления трансгрессии формировались погруженные береговые линии и комплекс реликтовых береговых и устьевых форм [13].

Окончательное оформление рельефа береговой зоны на побережьях Мирового океана в его современном виде происходило под влиянием стабилизации уровня моря 5–7 тыс. лет назад на отметках близких к современным. В течение последних 4–5 тыс. лет колебания уровня не превышали ± 1 –3 м с тенденцией к подъему около 1 мм/год (Каплин, Селиванов, 1999). Наиболее значительным следствием послеледниковой трансгрессии явилось затопление прибрежных равнин и проникновение морских вод во все депрессии береговой линии. Большинство речных долин превратились в ингрессионные заливы или приустьевые бухты. Дальность проникновения морских вод зависела от местных особенностей проявления послеледниковой трансгрессии, от уклонов водной поверхности в низовьях рек, величины стока речных наносов и тектонического режима побережья.

На шельфе Восточно – Сибирского, Чукотского и Берингово морей прослеживаются реликты древней гидрографической сети и древние береговые комплексы на глубинах 40–45, 30–36, 21–25, 15–16, 8–12 и 4–5 м [20]. Они представлены аккумулятивными террасовидными поверхностями, гравийно-галечными барьерными береговыми формами и древними речными дельтами. Мелководные губы Чаунская, Нольде, Колочинская, Анадырская и другие в позднеледниковый период представляли собой части речных долин, продолжавшихся на шельфе. В ходе трансгрессии эти долины могли быть перекрыты аккумулятивными береговыми формами типа пересыпей или двойных кос. В максимальную фазу послеледниковой трансгрессии арктические моря заполнили все прибрежные депрессии, подтопили устьевые участки рек, сформировав бухтовые побережья. Дальнейшее развитие береговой зоны окраинных морей Северо-Востока России шло по пути заполнения долинных заливов речным аллювием, образования береговых аккумулятивных форм за счет поступления наносов со стоком рек и с морского дна и, в меньшей степени, от абразии коренных мысов и прибрежных низменных равнин, сложенных мерзлыми отложениями.

Таким образом, наиболее характерным геоморфологическим обликом морских побережий Чукотского полуострова и Корякского нагорья является формирование фиордовых типов берегов. *Фиорды Чукотского полуострова* сосредоточены на его восточной окраине (залив Лаврентия, фиорды Мечигменского залива и пролива Сенявина) и частично на северном побережье Анадырского залива (залив Креста, бухта Провидения). Чукотские фиорды расчленяют одноименное нагорье, соответствующее докембрийскому Чукотско-Сьюардскому остаточному массиву. В альпийскую фазу горообразования массив испытал блоковые подвижки и был нарушен разломами. Ослабленные зоны и депрессии впоследствии были унаследованы фиордами [21, 22]. В плейстоцене горные области Чукотки неоднократно подверглись воледенению (вначале покровному, а на заключительных этапах – горно-долинному). Окончательная обработка

льдом фиордовых побережий происходила в последнюю ледниковую эпоху, во время горно-долинного оледенения конца позднего плейстоцена, оставившего на днищах фиордов следы ледниковой экзарации и валы конечных морен [23].

Фиорды юго-восточной части Чукотского полуострова приурочены к пересекающейся сети сквозных троговых долин северо-восточного (фиорды Аболешева, Румлет, Пэнкинггэй, Алера) и меридионального простирания (Провидения, Ыстигэт, Кивак). Помимо широко открытых к морю фиордов с глубинами до 100 м, встречаются фиорды, акватории которых отделены от моря гравийно-галечными пересыпями (лагуны Кивак и Имтук, озера Ыстигэт и Аччен). К типичным фиордам залива Креста обычно относят глубоко врезаемые в материк бухты Эгвэкинот и Этэлкуйым, окруженные горными массивами хребта Ыскатень. В целом для фиордов Чукотки характерно широкое развитие аккумулятивных форм (серповидные косы, двойные петлевидные косы – бары, аккумулятивные выступы), примыкающим к высоким береговым уступам, сложенных толщей туфо-порфиритов [21].

Фиорды Корякского нагорья расположены на трех участках побережья Берингово моря. В геологическом отношении они приурочены к складчатым структурам, состоящим из системы антиклиналей и синклиналей, осложненных разломами и сбросами. Первый из них, северо-восточный, находится в районе выхода к морю отрогов хребта Мейныпильгын с высотами 1000–1400 м, где в устьях троговых долин сформировались лагуны Орнанда, Аринай, Эмээм, Лахтина и озера Пекульнейского, отчлененные пересыпями. Росту аккумулятивных форм и замыканию лагун способствовал состав пород высоких (до 200–300 м) береговых уступов, сложенных легко размываемыми глинистыми сланцами и туфопесчаниками, в подножии которых выработаны глубокие волноприбойные ниши. Реки, впадающие в лагуны, формируют небольшие много рукавные дельты выполнения.

Фиорды центральной части Корякского нагорья от мыса Низкий до мыса Олюторский представлены заливами с открытым входом и лагунами, отчлененными пересыпями и косами, приуроченными к сложной сети троговых долин (бухты Дежнева, Анастасии, Наталии, Павла, Петра, Глубокая, Амаян и лагуны Аят, Амаян, Аловна, Мачевна, Таман, Тигиль, Северная, Южная, Явзван). В бухтах Дежнева, Анастасии, Наталии и Глубокой, куда впадают реки Укэлаят, Ильпи, Ватына и Анивая, фиорды унаследованы узкими долинами, окруженными горными массивами с альпийскими формами рельефа – нунатаками высотой 500–700 м. На берегах фиордов наблюдаются формы ледниковой экзарации – «курчавые скалы», «бараньи лбы», ледниковые цирки и моренные холмы. Тектоническое происхождение фиордов подтверждается прямолинейностью их конфигурации и многочисленными нарушениями, оперяющими разломы.

Последняя группа фиордов Корякского нагорья располагается в троговых долинах на побережье Олюторского залива от мыса Олюторского до полуострова Говена, рассекающих горные массивы хребтов Малиновского, Пилгинецкого, Калинай и Анива. Наиболее крупные открытые фиордовые заливы длиной от 2 до 6 км: Южно-Глубокий, Лаврова, Сомнения, приурочены к западному окончанию Олюторского залива, где берега сложены устойчивыми к размыву кремнистыми сланцами. Большинство небольших фиордов перегорожены пересыпями и превратились в лагуны Тинтикун, Средняя, Каубт, Эвекун, Кавача, иногда шириной до 6 км (лагуна Анива). Осевая часть Пылгинского хребта с высотами от 900 до 1200 м (гора Северная) в настоящее время сохранила следы оледенения в виде небольших долинных ледников и цирков. Тектоническая природа фиордов подтверждается прямолинейными очертаниями заливов и решетчатым рисунком речных долин.

Следующей характерной чертой геоморфологии берегов Чукотки является широкое развитие *лагунных* побережий. Как правило, этот тип берегов развит на низменных, слабо расчлененных и относительно отмелых побережьях Восточно – Сибирского и Чукотского морей и Анадырского залива Берингово моря. На побережье Восточно – Сибирского моря наблюдаются два участка с лагунными берегами: Первый из них приурочен к устьям рек Вэйвеем, Кэвеем и

Пегтымель, где современные косы и бары отчленили губы (лагуны) Нольде и Хычак, в которых упомянутые реки формируют многорукавные дельты выполнения. Второй находится в районе м. Биллинге, где сложная аккумулятивная форма (пересыпь) отделяет серию лагун: Иннукай, Валькакынмангкы и Уваргина в проливе Лонга [24, 25, 8].

На побережье Чукотского моря тоже выделяются два участка с лагунным типом берега. Первый занимает значительную часть побережья от мыса Якан до мыса Ванкарем, где цепь лагун и береговых баров (Пильгыкэй, Рьыпильгын, Каныгмокинманкы, Акатан, Эрьюкинманкы, Нутэвьи, Ванкарем) протягивается почти непрерывно на расстоянии 100 км, прерываясь небольшим коренным мысом Шмидта. Малые реки, при впадении в лагуны, формируют небольшие многорукавные дельты выполнения (Амгуэма, Вельмай, Екаэнмываам, Кывэквин, Эквиватап, Рьывеем, Пильгыкэй). Между лагунами и приморской горной грядой располагается широкая холмистая прибрежная аллювиально-озерная равнина с высотами до 20–30 м. Лагунные пересыпи обычно представлены одним береговым валом, сложенным песком и гравием.

Второй участок лагунного берега расположен между коренными мысами Джэрэтлен и Сердце-Камень и представляет собой цепь небольших (Эйнэнэквын, Мэминпильгын) и обширных (Нэсканпильгын) лагун. Часть из них проникает почти на 25 км вглубь холмистых предгорий хребта Кынэтлон с высотами до 200–400 м, другие – вытянуты вдоль берега на несколько десятков километров. В тылу лагун реки Нгагтевеем, Кынэтлювеем и Арынайваам образуют небольшие многорукавные дельты выполнения. Мористая сторона пересыпи Мэминпильгын – выровнена, а с внутренней имеет неровные очертания. Местами пересыпь расширяется до сотен метров, отделена от пляжа уступом высотой до 2,5 м, сложенным переслаивающейся толщей торфяников и песков. Вблизи восточного корня пересыпь сужается до десятков метров и прибойный поток переливается в шторм через пересыпь в лагуну. Лагуна Мэминпильгын, как и все другие лагуны на побережье Чукотского моря, образовалась при затоплении прибрежной холмисто-западинной низменности в результате постгляциальной трансгрессии моря и выравнивании изрезанной береговой линии за счет причленения песчаных пересыпей при поперечном перемещении донных наносов к берегу.

На северо-восточном низменном побережье *Анадырского залива Берингова моря* между мысами Гека и Гитера можно выделить два участка с лагунным типом берега. Первый расположен в устье реки Туманской, где пересыпь (коса Готовцева) отделяет лагуну Тымна. Второй представлен цепью лагун (Чимчинейкуйым, Средняя, Глубокая, Пыркакуйым, Кэйнгыпильгын, Кинноткайкуйым, Южная, Куйменей), вдающихся в сушу на 2–5 км. Реки Чимчинейвеем, Кынноткай, Кытапваам Чимчинейвеем, Кынноткай, Кытапваам, втекающие в лагуны, формируют многорукавные дельты выполнения. Все лагуны отделены от моря единой пересыпью шириной до 300–400 м (коса Тепанерген), сложенной песчано-галечниковым материалом и сложенной дюнами высотой от 4–5 до 10–12 м [13].

Заключение

На формирование рельефа береговой зоны Чукотки и Корякского нагорья наибольшее влияние оказала послеледниковая трансгрессия моря, в ходе которой произошло подтопление низменных холмистых прибрежных равнин, речных долин и фиордов. Активное воздействие волновой деятельности моря привело к размыву верхней части подводного склона, перестройке его профиля и отступанию аккумулятивных форм в сторону суши и создание современных очертаний береговой линии. Выдвинутые в море участки побережья, сложенные толщей рыхлых четвертичных отложений, были частично размыты волнами, а наносы вовлекались в продольное и поперечное перемещения, формируя косы и пересыпи, что привело к общему выравниванию береговой линии. В настоящее время в условиях подъема уровня Мирового океана общая тенденция к перестройке подводного склона и береговой зоны сохраняется и может быть крайне опасна для побережий, сложенных сильно льдистыми песчано-суглинистыми аллювиально-озерными отложениями. Дальнейшее повышение глобальной температуры существен-

но смягчит климат арктических побережий, вызовет деградацию мерзлоты, протаивание подземных льдов и ускорит процесс отступления береговых абразионных уступов, морского края речных дельт. Учитывая региональные геолого-геоморфологические особенности побережий Чукотского и Берингова моря, следует ожидать, что возможный подъем уровня моря приведет к протаиванию и деградации многолетнемерзлых пород и жильных льдов.

Литература

1. Морфодинамика устьевых систем крупных рек арктического побережья России: атлас / ответственные редакторы: В.Н. Коротаев, Г.И. Рычагов, Н.А. Римский-Корсаков. Москва: АПРА, 2017. – 148 с. – Текст: непосредственный.
2. Новейшие отложения и палеогеография плейстоцена Чукотки / под редакцией П.А. Каплина. – Москва: Наука, 1980. – 296 с. – Текст: непосредственный.
3. Железнов-Чукотский Н.К., Природные условия и ресурсы Чукотского полуострова: монография / Н.К. Железнов-Чукотский, Секретарева Н.А., Т.И. Астахова, А.И. Жукова, Ю.В. Тихомиров, С.А. Лозовская. – Москва: ГЕОС, 2003. – 503 с. – Текст: непосредственный.
4. Петров, О.М. Стратиграфия и фауна морских моллюсков четвертичных отложений Чукотского полуострова: монография / О.М. Петров. – Москва: Наука, 1966. – 290 с. – Текст: непосредственный.
5. Природа и ресурсы Чукотки: Труды ЧФ СВКНИИ ДВО РАН / ответственный редактор В.С. Кривошеков и др. – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2006г. – Выпуск 11). – 323 с. – Текст: непосредственный.
6. Леонтьев, О.К. Карта типов берегов и побережий Мирового океана / О.К. Леонтьев, С.А. Лукьянова, Л.Г. Никифоров [и др.]. – Текст: непосредственный // Рельеф и ландшафты. – Москва : Издательство МГУ, 1977. – С. 27-43.
7. Берега Тихого океана; под общей редакцией В.П. Зенкович. – Москва : Наука, 1967. – 373 с. – Текст: непосредственный.
8. Каплин, П.А. Берега / П.А. Каплин, О.К. Леонтьев, С.А. Лукьянова, Л.Г. Никифоров. – Москва: Мысль, 1991. – 479 с. – Текст: непосредственный.
9. Тараканов, Л.В. Строение и абсолютный возраст новейших отложений Валькарайской низменности (Северная Чукотка) / Л.В. Тараканов, П.А. Каплин, В.И. Курсалова – Текст: непосредственный // Доклады Академии наук СССР. 1974. Том 216. № 5. – С. 1128-1130.
10. Особенности формирования рельефа и современных осадков прибрежной зоны дальневосточных морей СССР. Москва: Наука, 1971. – 181 с. – Текст: непосредственный.
11. Ионин, А.С. Берега Берингова моря / А.С. Ионин. – Москва: Наука, 1959. – 375 с. – Текст: непосредственный.
12. Ионин, А.С. Исследования по динамике и морфологии советских берегов Чукотского и Берингова морей / А.С. Ионин. – Текст: непосредственный // Труды Океанографической комиссии АН СССР. – 1959. – Т. 4. – С. 205-214.
13. Каплин, П.А. Особенности динамики и строения берегов полярных морей (на примере побережья Чукотского моря) / П.А. Каплин. – Текст: непосредственный // Новые исследования береговых процессов. – Москва: Наука, 1971. – С. 22-34.
14. Щербаков, Ф.А. Некоторые данные о послеледниковой трансгрессии Берингова моря / Ф.А. Щербаков. – Текст: непосредственный // Труды Института Океанологии АН СССР. 1961. – Т. 48. – С. 49-60.
15. Щербаков, Ф.А. Литологическое исследование наносов побережья Анадырского залива / Ф.А. Щербаков. – Текст: непосредственный // Труды Океанографической комиссии АН СССР. Т. 4 (Вопросы изучения морских берегов), 1959. – С. 31-43.
16. Каплин, П.А. Новейшая история побережий Мирового океана / П.А. Каплин. – Москва: Издательство МГУ, 1973. – 265 с. – Текст: непосредственный.
17. Каплин, П.А. Изменение уровня морей России и развитие берегов: прошлое, настоящее и будущее / П.А. Каплин, А.О. Селиванов. – Москва: ГЕОС, 1999. – 299 с. – Текст: непосредственный.

18. Каплин, П.А. Вопросы геоморфологии и палеогеографии морских побережий и шельфа / П.А. Каплин. – Москва: Географический факультет МГУ, 2010. – 620 с. – Текст: непосредственный.
19. Морозова, Л.Н. Основные черты истории развития шельфа Чукотского моря в послеледниковое время / Л.Н. Морозова, В.Е. Бирюков, Н.А. Волкова. – Текст: непосредственный // Исследование прибрежных равнин и шельфа Арктических морей. – Москва: Издательство МГУ, 1979. – С. 16-21.
20. Никифоров, С.Л. Основные черты развития шельфа Чукотского и Восточно – Сибирского морей в позднелайстоцен-голоценовое время / С.Л. Никифоров. – Текст: непосредственный // Геоморфология. 1989. – № 3. – С. 85-89.
21. Каплин, П.А. Фиордовые побережья Советского Союза / П.А. Каплин. – Москва: Издательство АН СССР, 1962. – 188 с. – Текст: непосредственный.
22. Каплин, П.А. Эволюция береговой линии фиордовых районов / П.А. Каплин. – Текст: непосредственный // Труды Океанографической комиссии АН СССР. Т. 4. 1969. – С. 55-65.
23. Авенариус, И.Г. Морфоструктурный план и некоторые вопросы палеогеографии позднего плейстоцена-голоцена шельфа залива Креста (Берингово море) / И.Г. Авенариус, А.А. Трещов, Б.П. Лопатин, Ю.П. Дегтяренко. – Текст: непосредственный // Проблемы четвертичной истории шельфа. – Москва: Наука, 1982. – С. 86-98.
24. Бабаев, Ю.М. Основные черты развития рельефа лагунного побережья Чукотского полуострова в голоцене / Ю.М. Бабаев, Л.А. Жиндарев. – Текст: непосредственный // Исследования динамики рельефа морских побережий. – Москва, 1979. – С. 111-119.
25. Данилов, И.Д. Строение и развитие лагун и баров арктического побережья Чукотки / И.Д. Данилов, Г.Н. Недешева, Е.И. Полякова. – Текст: непосредственный // Геоморфология. 1980. – № 4. – С. 77-84.

References

1. Morfodinamika ust'evykh sistem krupnykh rek arkticheskogo poberezh'ja Rossii: atlas / otvetstvennyye redaktory: V.N. Korotaev, G.I. Rychagov, N.A. Rimskij-Korsakov. Moskva: APRA, 2017. – 148 s. – Tekst: neposredstvennyj.
2. Novejšie otlozhenija i paleogeografija plejstocena Chukotki / pod redakciej P.A. Kaplina. – Moskva: Nauka, 1980. – 296 s. – Tekst: neposredstvennyj.
3. Zhelezno-Chukotskij N.K., Prirodnye uslovija i resursy Chukotskogo poluostrova: monografija / N.K. Zhelezno-Chukotskij, Sekretareva N.A., T.I. Astahova, A.I. Zhukova, Ju.V. Tihomirov, S.A. Lozovskaja. – Moskva: GEOS, 2003. – 503 s. – Tekst: neposredstvennyj.
4. Petrov, O.M. Stratigrafija i fauna morskih molljuskov chetvertichnyh otlozhenij Chukotskogo poluostrova: monografija / O.M. Petrov. – Moskva: Nauka, 1966. – 290 s. – Tekst: neposredstvennyj.
5. Priroda i resursy Chukotki: Trudy ChF SVKNII DVO RAN / otvetstvennyj redaktor V.S. Krivoshekov i dr. – Magadan: SVNC DVO RAN, 2006g. – Vypusk 11). – 323 s. – Tekst: neposredstvennyj.
6. Leont'ev, O.K. Karta tipov beregov i poberezhij Mirovogo okeana / O.K. Leont'ev, S.A. Luk'janova, L.G. Nikiforov [i dr.]. – Tekst: neposredstvennyj // Rel'ef i landshafty. – Moskva: Izdatel'stvo MGU, 1977. – S. 27-43.
7. Berega Tihogo okeana; pod obshhej redakciej V.P. Zenkovich. – Moskva: Nauka, 1967. – 373 s. – Tekst: neposredstvennyj.
8. Kaplin, P.A. Berega / P.A. Kaplin, O.K. Leont'ev, S.A. Luk'janova, L.G. Nikiforov. – Moskva: Mysl', 1991. – 479 s. – Tekst: neposredstvennyj.
9. Tarakanov, L.V. Stroenie i absoljutnyj vozrast novejših otlozhenij Val'karajskoj nizmennosti (Severnaja Chukotka) / L.V. Tarakanov, P.A. Kaplin, V.I. Kursalova – Tekst: neposredstvennyj // Doklady Akademii nauk SSSR. 1974. Tom 216. № 5. – S. 1128-1130.
10. Osobennosti formirovanija rel'efa i sovremennyh osadkov pribrezhnoj zony dal'nevostochnykh morej SSSR. Moskva: Nauka, 1971. – 181 s. – Tekst: neposredstvennyj.
11. Ionin, A.S. Berega Beringova morja / A.S. Ionin. – Moskva: Nauka, 1959. – 375 s. – Tekst: neposredstvennyj.

12. Ionin, A.S. Issledovanija po dinamike i morfologii sovetskih beregov Chukotskogo i Beringova morej / A.S. Ionin. – Tekst: neposredstvennyj // Trudy Okeanograficheskoy komissii AN SSSR. – 1959. – T. 4. – S. 205-214.
13. Kaplin, P.A. Osobennosti dinamiki i stroenija beregov poljarnyh morej (na primere poberezh'ja Chukotskogo morja) / P.A. Kaplin. – Tekst: neposredstvennyj // Novye issledovanija beregovyh processov. – Moskva: Nauka, 1971. – S. 22-34.
14. Shherbakov, F.A. Nekotorye dannye o poslednikovoj transgressii Beringova morja / F.A. Shherbakov. – Tekst: neposredstvennyj // Trudy Instituta Okeanologii AN SSSR. 1961. – T. 48. – S. 49-60.
15. Shherbakov, F.A. Litologicheskoe issledovanie nanosov poberezh'ja Anadyrskogo zaliva / F.A. Shherbakov. – Tekst: neposredstvennyj // Trudy Okeanograficheskoy komissii AN SSSR. T. 4 (Voprosy izuchenija morskikh beregov), 1959. – S. 31-43.
16. Kaplin, P.A. Novejschaja istorija poberezhij Mirovogo okeana / P.A. Kaplin. – Moskva: Izdatel'stvo MGU, 1973. – 265 s. – Tekst: neposredstvennyj.
17. Kaplin, P.A. Izmenenie urovnja morej Rossii i razvitie beregov: proshloe, nastojashhee i budushhee / P.A. Kaplin, A.O. Selivanov. – Moskva: GEOS, 1999. – 299 s. – Tekst: neposredstvennyj.
18. Kaplin, P.A. Voprosy geomorfologii i paleogeografii morskikh poberezhij i shel'fa / P.A. Kaplin. – Moskva: Geograficheskij fakul'tet MGU, 2010. – 620 s. – Tekst: neposredstvennyj.
19. Morozova, L.N. Osnovnye cherty istorii razvitiya shel'fa Chukotskogo morja v poslednikovoe vremja / L.N. Morozova, V.E. Birjukov, N.A. Volkova. – Tekst: neposredstvennyj // Issledovanie pribrezhnykh ravnin i shel'fa Arkticheskikh morej. – Moskva: Izdatel'stvo MGU, 1979. – S. 16-21.
20. Nikiforov, S.L. Osnovnye cherty razvitiya shel'fa Chukotskogo i Vostochno-Sibirskogo morej v pozdneplejstocen-golocenovoe vremja / S.L. Nikiforov. – Tekst: neposredstvennyj // Geomorfologija. 1989. – № 3. – S. 85-89.
21. Kaplin, P.A. Fiordovye poberezh'ja Sovetskogo Sojuza / P.A. Kaplin. – Moskva: Izdatel'stvo AN SSSR, 1962. – 188 s. – Tekst: neposredstvennyj.
22. Kaplin, P.A. Jevojucija beregovoj linii fiordovykh rajonov / P.A. Kaplin. – Tekst: neposredstvennyj // Trudy Okeanograficheskoy komissii AN SSSR. T. 4. 1969. – S. 55-65.
23. Avenarius, I.G. Morfostrukturnyj plan i nekotorye voprosy paleogeografii pozdnego plejstocena-golocena shel'fa zaliva Kresta (Beringovo more) / I.G. Avenarius, A.A. Treshhov, B.P. Lopatin, Ju.P. Degtjarenko. – Tekst: neposredstvennyj // Problemy chetvertichnoj istorii shel'fa. – Moskva: Nauka, 1982. – S. 86-98.
24. Babaev, Ju.M. Osnovnye cherty razvitiya rel'efa lagunnogo poberezh'ja Chukotskogo poluoostrova v golocene / Ju.M. Babaev, L.A. Zhindarev. – Tekst: neposredstvennyj // Issledovanija dinamiki rel'efa morskikh poberezhij. – Moskva, 1979. – S. 111-119.
25. Danilov, I.D. Stroenie i razvitie lagun i barov arkticheskogo poberezh'ja Chukotki / I.D. Danilov, G.N. Nedesheva, E.I. Poljakova. – Tekst: neposredstvennyj // Geomorfologija. 1980. – № 4. – S. 77-84.

Сведения об авторах

КОРОТАЕВ Владислав Николаевич – д.г.н., с.н.с., в.н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: vlaskor@mail.ru

KOROTAEV Vladislav Nikolaevich – Doctor of Geological Sciences, Leading Researcher, N. I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Stream Processes, Lomonosov Moscow State University, e-mail: vlaskor@mail.ru

ПОМОРЦЕВ Олег Александрович – к.г.н., доцент по кафедре мерзлотоведения, доцент кафедры «Прикладная геология» ГРФ СВФУ им. М.К. Аммосова, e-mail: olegpomortsev@mail.ru

POMORTSEV Oleg Aleksandrovich – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Permafrost Studies, Department of Applied Geology, Ammosov North-Eastern Federal University, e-mail: olegpomortsev@mail.ru

О. А. Поморцев¹, Е. П. Кашкаров², Н. В. Ловелиус³¹ Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия² Международный институт исследования ритмов, штат Вашингтон, США³ Педагогический университет им. А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: olegpomortsev@mail.ru

e-mail: e.kashkarov@internet.ru

e-mail: lovelius@mail.ru

СВЕРХДЛИННЫЕ ДЕНДРОШКАЛЫ ВЫСОКОГОРИЙ СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ И ВЫСОКИХ ШИРОТ ЕВРАЗИИ

Аннотация. На основе 7000-летних древесно-кольцевых хронологий по сосне остистой (*Pinus aristata*) с верхней границы леса Белых гор и Большого Бассейна Северной Америки (шкала Фергюсона), и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) с полярной границы леса на полуострове Ямал (Северная Евразия, шкала Хантемирова) реконструирован отрезок голоцена от его климатического оптимума до современности. Выявлен математически точный ритм климата, трижды повторяющийся на графиках дендрохронологических шкал с частотой в 2600 лет. Определена связь стволового прироста с колебаниями уровня Мирового океана, Каспия и ледовитостью Арктики, а также развитием глобальных засух.

Закономерности изменений климата, синхронно записанные в сверхдлинных дендрошкалах двух материков Северного полушария астрономически точным ритмом в 2600 лет, наиболее достоверно отражают климат Земли в последних тысячелетиях и дают единственный ключ к его прогнозу на будущее.

Ключевые слова: Шкала Фергюсона, шкала Хантемирова, голоцен, климатический оптимум, 2600-летний ритм, стволовой прирост, циркуляция атмосферы, потепление и похолодание климата.

O. A. Pomortsev¹, E. P. Kashkarov², N. V. Lovelius³¹ Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia² International Rhythm Research Institute, Trout Lake, WA USA³ The Herzen State Pedagogical University, Saint Petersburg, Russia

e-mail: olegpomortsev@mail.ru

e-mail: e.kashkarov@internet.ru

e-mail: lovelius@mail

ULTRA-LONG DENDROSCALES OF THE HIGH LATITUDES IN NORTH AMERICA AND THE HIGH LATITUDES IN EURASIA

Abstract. Based on 7,000-year tree-ring chronologies for the *Pinus aristata* from the tree line of White Mountains and Great Basin of North America (Ferguson's scale), and *Larix sibirica* from the polar forest edge on Yamal Peninsula (Northern Eurasia, Khantemirov's scale) reconstructed the Holocene section from its climatic optimum to the present day. Mathematically precise global rhythm, which repeat three times on charts of dendrochronological scales with a frequency in 2,600 years, are revealed. The relationship of the stem growth with fluctuations in level of the World Ocean, Caspian Sea and Arctic sea ice, as well as the development of global droughts, has been determined.

Regularities of the climate change, synchronously recorded in ultra-long dendroscopes of two continents of the Northern Hemisphere by astronomically accurate rhythm in 2,600 years, most reliably reflect the Earth's climate in recent millennia and provide the only key to its prediction in future.

Keywords: Ferguson scale, Khantemirov scale, Holocene, climatic optimum, 2,600-year rhythm, stem growth, atmospheric circulation, warming and cooling climate.

Введение

На рубеже XXI века неоценимый вклад во все науки с приставками хроно- и палео- дала дендрохронологическая шкала Чарльза Фергюсона (Charles W. Ferguson) [1] протяжённостью в 7104 года. В графическом виде она была реконструирована Н.В. Ловелиусом по данным Фергюсона по сосне остистой (*Pinus aristata*) из Белых гор и Большого Бассейна Северной Америки, и позднее дополнена количественными данными инструментальных наблюдений за климатом за последние 300 лет. Шкала охватывает почти весь голоцен от его климатического оптимума 7 тыс. л.н. до современности и позволяет количественно и качественно оценить развитие основных климатических событий за столь продолжительный отрезок времени [2].

Другим неоценимым свойством шкалы Фергюсона является упорядочивание основных событий голоцена по ходу астрономически точного 2600-летнего орбитального ритма, повторяющегося на шкале трижды. Этот ритм открыт на геофизических, биологических и гляциологических материалах за 13700 лет Роджером Бреем [3, 4], а на шкале Фергюсона – О.А.Поморцевым. Именно Поморцев увидел на шкале математически точные периодические закономерности, повторяющиеся с частотой в 2600 лет и позволяющие точнее интерпретировать известные и гипотетические события, имеющие строгую ритмическую обусловленность далеко за рамками голоцена. С привлечением 2600-летнего ритма шкала Фергюсона без всякой натяжки стала единственным ключевым инструментом для анализа всего здания и голоцена, и плейстоцена. Эта своеобразная «палео-линейка» открыла новые рубежи исследования мало понятного для нас отрезка времени в истории Земли.

Ещё одной находкой стала для нас дендрохронологическая шкала Р.М. Хантемирова, построенная за 7200 лет по лиственнице сибирской (*Larix sibirica*) с Ямала [5, 6]. Она явилась зеркальным отражением шкалы Фергюсона, как две половинки одного и того же орбитального ритма в 2600 лет. Сосна остистая показала работу ритма в условиях повышенной сухости климата в высокогорьях юга Северной Америки, лиственница – в условиях повышенной влажности на широтном пределе её распространения на севере Евразии. Первая чутко реагировала на рост увлажнённости, вторая – на рост температуры. В итоге обе шкалы сложили в одну картину изменение климата Земли и позволили наиболее обоснованно подойти к объяснению его закономерностей как с теоретической, так и с практической стороны.

Материал и его анализ

В публикации «Биоклиматическая хронология голоцена: реконструкция и прогноз» [7] мы показали, что колебания уровня Каспия, прирост сосны остистой (верхняя граница лесного пояса) и лиственницы сибирской (граница тайги и тундры) демонстрируют единую закономерность влияния 2600-летнего ритма, который считается солнечно обусловленным [3, 4]. В сверхдлинных – более чем 7-тысячелетних древесно-кольцевых шкалах Фергюсона и Хантемирова, регистрируются три последовательные реализации 2600-летнего ритма [2, 7]. На кривой уровень Каспия, более значительной по протяженности таких реализаций пять (рис 1).

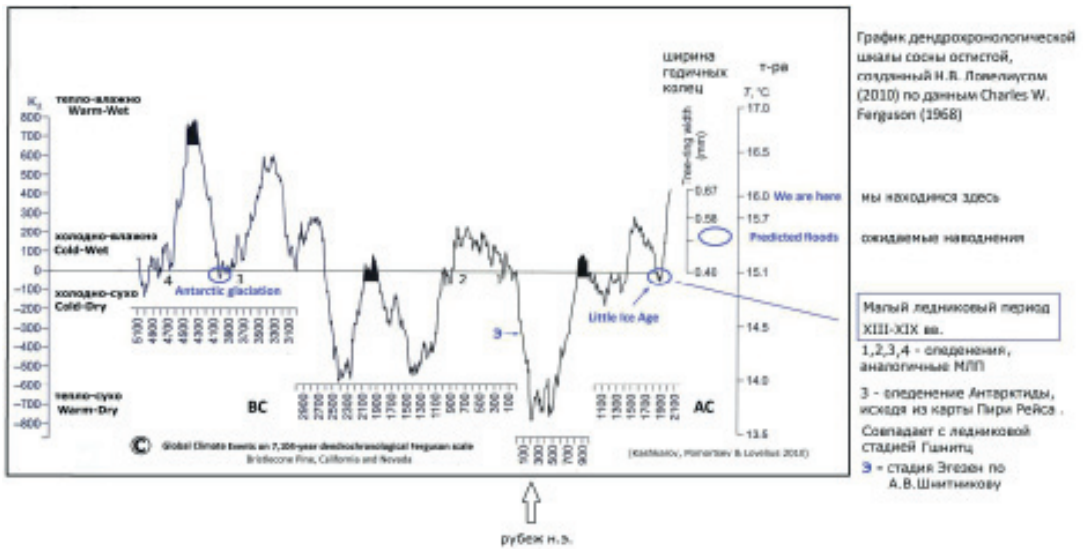
Казалось бы, при совершенно разных природных условиях, в которых произрастают леса севера Евразии и юга Северной Америки, и меняется уровень Каспия, не следовало бы ожидать столь тождественных откликов на 2600-летние осцилляции солнечной активности. Сосна остистая в Белых горах и Большом бассейне произрастает в экстремально сухих условиях верхней границы леса; лиственница сибирская на Ямале – в холодных и влажных условиях заполярья; Каспий лежит в зоне пустынь. Но как оказалось 2500-2600-летняя периодичность известна в динамике уровня Мирового океана, а также в подвижках горных ледников [26, 6, 23]. Лимитирующий фактор каждого из рассматриваемых явлений четко отражает поворотные моменты глобального орбитального ритма и его синхронное проявление в земных процессах.

Вместе с тем, наряду с единой ритмической закономерностью реализации природных процессов, в их динамике существуют и региональные особенности. Именно они, наряду с единой

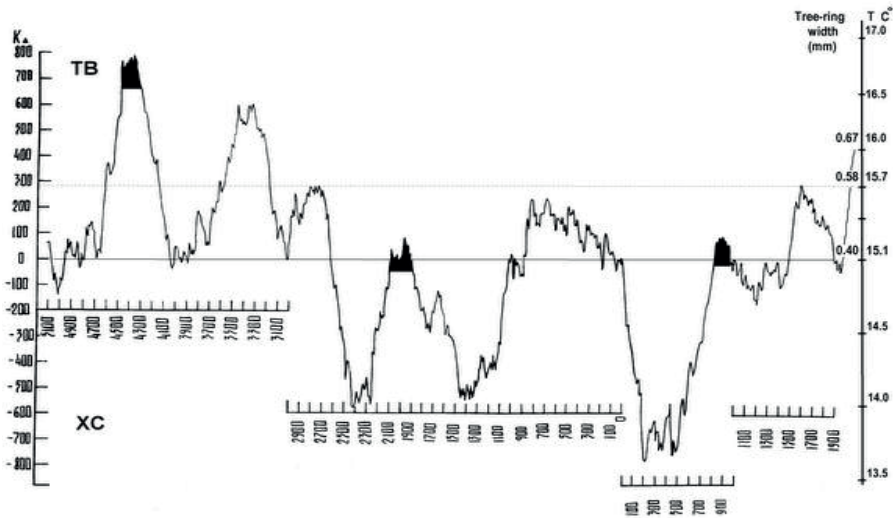
ритмической закономерностью, являются важнейшим и необходимым условием обоснования региональных прогнозов.

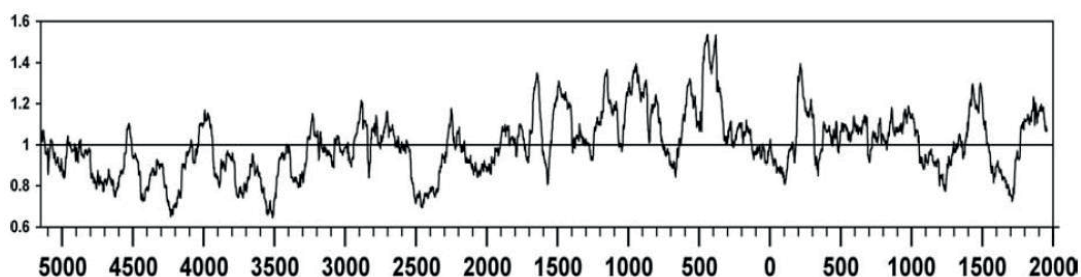
Шкала Фергюсона (см. рис. 1, а), дополненная сборами сотрудников Туссоновской лаборатории [11], с математической точностью регистрирует три волны 2600-летнего ритма. Последняя из них развивается в современности, и, судя по предыдущим осцилляциям, завершится через 800 лет. Из ходов кривой Фергюсона (см. рис. 1 а) видно, что начало каждого 2600-летнего ритма, «записанного» на шкале, открывают минимумы прироста сосны, последовательно проявившиеся 7,0 – 4,4 – 1,8 тыс. л. н. Этим минимумам соответствуют глобальные засухи голоцена [2]. Максимумы приростов сопряжены, напротив, с теплыми и влажными периодами климата – океаническими трансгрессиями 6,7 – 3,9 – 1,3 тыс. л. н.

Трансгрессии уровня Каспия – главного индикатора похолоданий и потеплений Арктики согласно Л.С. Бергу [12], устойчиво запаздывают относительно пиков трансгрессий океана на 0,5-0,8 тыс. лет [10]. Они совпадают с локальными минимумами приростов сосны 5,9 – 3,2 – 0,8 тыс. л. н., проявившимися вслед за максимумами прироста по ходу всех трех реализаций 2600-летних волн приростов. При этом регрессии Каспия тяготеют к главным минимумам кривой, т.е., подчинены ритму глобальных засух (см. рис. 1., а; с).

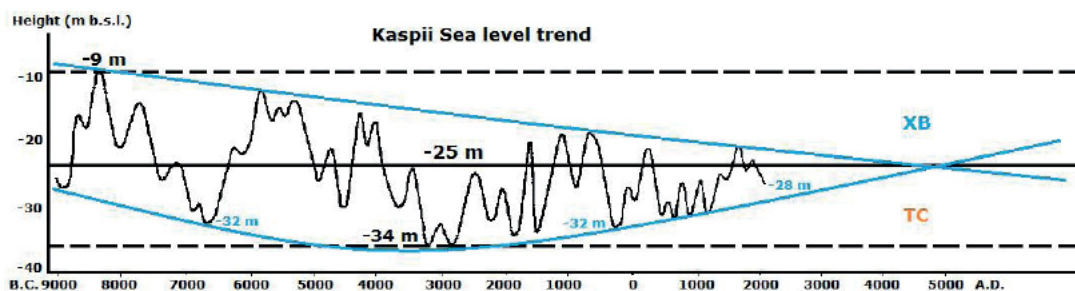


а)





в)



с)

Рис. 1. а) Динамика стволового прироста сосны остистой из Белых гор и Большого Бассейна Северной Америки; б) кривая Фергюсона в графическом сопоставлении с кривой реконструкции температуры летних месяцев по лиственнице сибирской (полуостров Ямал) выполненной Р.М. Хантемировым [5]; в) Уровень Каспия в голоцене.

Fig. 1. а) The dynamics of stem growth of spinous pine from the White Mountains and the Great Basin of North America; б) the Fergusn curve in graphical comparison with the curve of reconstruction of the temperature of the summer months for Siberian larch (Yamal Peninsula) performed by R.M. Khantemirov [5]; в) the level of the Caspian Sea in the Holocene

Интересен отклик шкалы на похолодания голоцена, вызывавшие активизацию горного оледенения Северной Америки. Детальное исследование моренных гряд, оставленных ледниками Скалистых и Каскадных гор, проведено Джорджем Дентоном и Вибьёрном Карленом [9]. Оно показало, что кульминация Малого ледникового периода пришлось здесь на 1700 г. н.э. и явилась последним из пяти пиков голоценовых похолоданий, вызывавших наступание ледников. «Для всего голоцена было характерно чередование холодных и теплых интервалов, когда происходило попеременное разрастание и сокращение оледенения. Эти интервалы накладывались на длительную тенденцию к похолоданию. Этапы активизации ледников имели длительность до 900 лет, а этапы их отступления 1750 лет». Опираясь на данные по абсолютному возрасту холодных пиков голоцена 10,5 – 8,0 – 5,3 – 2,8 – 0,25 тыс. л. н., Джордж Дентон и Вибьёрн Карлен выдвинули гипотезу о существовании особого климатического «цикла малого ледникового периода», который имеет продолжительность около 2500 лет и систематически накладывается на более крупные ледниково-межледниковые циклы [по 9 с.211]. Прямое сопоставление циклов Дентона и Карлена, и ходов кривой Фергюсона, показывает, что ледниковые циклы в Скалистых и Каскадных горах проявились не на минимумах стволового прироста сосны, как следовало ожидать, а на локальных максимумах, предшествовавших минимумам. Относительно пиков трансгрессий Мирового океана похолодания Дентона и Карлена запаздывали на 0,9-1,4 тыс. лет. Так же запаздывали они и относительно трансгрессий Каспия, но на вдвое меньший интервал времени: 0,4 – 0,6 тыс. лет.

В целом, опираясь на шкалу Фергюсона, можно отметить следующую последовательность в динамике природной среды голоцена Северной Америки и Северной Азии по ходу 2600-летних ритмических волн:

1) начало каждого 2600-летнего ритма стволовой прирост сосны маркирует минимум ширины годовичных колец и индицирует глубокие засухи голоцена, последовательно проявившиеся на равнинах Северной Америки и Северной Азии – 7,0 – 4,4 и 1,8 тыс. л. н. На эти же периоды приходится пики глубоких регрессий уровня Каспийского моря и потепление Арктики;

2) максимумы прироста, следующие вслед за минимумами по ходу каждого 2600-летнего ритма, хронологически близки к периодам тепло-влажного климата океанических трансгрессий 6,7 – 3,9 – 1,3 тыс. л. н.;

3) периоды пониженного прироста отмечаются непосредственно за максимумами; они совпадают с похолоданиями Арктики и трансгрессиями Каспия 8,1 – 5,9 – 3,2 – 0,8 тыс. л. н.;

4) последующее повышение прироста синфазно периодам прохладного и влажного климата (циклы Дентона и Карлена) 5,3 – 2,8 – 0,25 тыс. л. н., активизировавшего горное оледенение Северной Америки.

Таким образом, по ходу 2600-летнего ритма видна последовательность развития климата от сухого к тепло-влажному, затем – к холодно-влажному и вновь сухому, с переходными периодами. Вместе с тем, если в самом начале шкалы Фергюсона – при первой, и, отчасти, второй реализации 2600-летнего ритма, общая тенденция шкалы направлена на понижение стволового прироста, т.е. на последовательное ухудшение биоклиматических условий, то в последней, современной, реализации, напротив, отмечается тенденция к усилению динамики прироста, т.е. улучшению условий. На сегодня они максимально приблизились к тепло-влажным условиям климатического оптимума голоцена, имевшим место около 6500-6300 л.н. со среднегодовой температурой Земли в 15,7°C (см. рис. 1). Последнее может свидетельствовать в пользу влияния более крупного ритмического процесса, «подстилающего» 2600-летний ритм и диктующего направленность климатических изменений по ходу его реализации.

Шкала Хантемирова по лиственнице сибирской с Ямала, как и шкала Фергюсона, отбивает тот же 2600-летний ритм на протяжении последних 7200 лет. На рис. 1 (в) шкала Хантемирова представлена в виде кривой среднелетних температур. Обращает на себя внимание очень высокая согласованность минимумов 2600-летних ритмов на шкалах Хантемирова и Фергюсона. Однако, несмотря на единый «пульс» ритмики обеих шкал, главные тенденции в ходах кривых Фергюсона и Хантемирова на большей части их реализации (см. рис. 1а; в) носят разнонаправленный зеркальный характер. Если в приростах сосны из Белых гор и Большого Бассейна в среднем голоцене (суббореальное время) преобладала тенденция к понижению динамики прироста, то на Ямале, напротив, к усилению, с пиком около 2400-2500 л.н. У сосны остистой этот максимум прироста реализовался значительно раньше – во время климатического оптимума голоцена 6500-6300 л.н. В субатлантическое время на Ямале, после максимума 2500 л.н., проявилась тенденция к понижению прироста, тогда как у сосны остистой, после минимума 1800-1500 л.н., наблюдалась явная тенденция к его усилению.

Наряду с различиями в главных трендах на сопоставляемых отрезках кривых наблюдаются различия в динамике их аномалий менее значительного масштаба. Так, большинству положительных аномалий приростов древесных колец на дендрограмме сосны отвечают асинфазные им отрицательные аномалии температуры на дендрограмме лиственницы. Кроме того, в динамике ямальской кривой, наряду с 2600-летним ритмом, отчетливо проявился ритм, близкий по продолжительности к 1850-летнему ритму А.В. Шнитникова. Его минимумы приходятся на 5500, 3600, 1900 и 250 л.н. Они хронологически близки известным стадиям горного оледенения Евразии: Фернау (100-300 л. н.); Эгезен (ок. 2000 л. н.); Даун (ок. 3900 л.н.) и Гшнитц (ок. 5700 л.н.) – по А.В. Шнитникову [13] и Е.В. Максиму [14, 15]. Датировки этих стадий были ранее подтверждены в Северном Тянь-Шане [15, 16] и в Южном Верхоянье [18].

Вместе с 1850-летним ритмом на ямальской кривой считаются ритмические осцилляции с продолжительностью периода в 900 лет. Их минимумы приурочены к 5500, 4450, 3600, 2650 и 750 л.н. Выделяются и менее продолжительные циклы от 300-500-летних до вековых и внутривековых.

Главные тенденции в динамике уровня Каспия, проявившиеся за последние семь тысячелетий, хорошо согласуются с тенденциями в ходах кривой летней температуры на Ямале (см. рис. 1 в и с). А выявленная согласованность в ходах ямальской кривой и стадийными колебаниями горных ледников Тянь-Шаня и Верхоянья свидетельствует в пользу представлений А.В. Шнитникова и Е.В. Максимова о едином ритмическом «сценарии» голоцена для материков Северного полушария.

Обсуждение результатов

Периоды понижения летних температур на Ямале, нашедшие отражения в уменьшении стволового прироста лиственницы сибирской, могут быть связаны с усилением режима циркуляции высоких течений атмосферы нагнетающими в приполярные области воздушные массы из низких широт. Обратный отток этого воздуха на континенты происходит подобно разгрузкам морских нагонов путем срабатывания так называемых разрывных течений. О прорывах масс холодного воздуха из полярных широт на равнины Северной Евразии и Северной Америки свидетельствуют периодические заморозки, снег и град ставшие типичными для теплых сезонов этих континентов. При этом прорывы холодного воздуха из Арктики могут отрицательно влиять на вегетацию растений не только приарктических, но и удаленных от Арктики на многие десятки и сотни километров экосистем умеренной и даже притропической зоны. Подобная ситуация наблюдается в настоящее время на равнинах Европы и Азии, где при резком потеплении зим летом увеличивается частота вторжений холодного воздуха, сопровождающихся заморозками, ураганскими ветрами, ливнями, потопами, градом и снежными бурями.

Подобные процессы имели место в недалеком прошлом в масштабах векового ритма XX столетия, обеспеченного рядами инструментальных гидрометеорологических наблюдений, в частности, длиннорядной и репрезентативной станции Восточной Сибири – ГМС Якутск (ряд с 1829 г.), расположенной в ядре локализации Азиатского антициклона (рис. 2.).

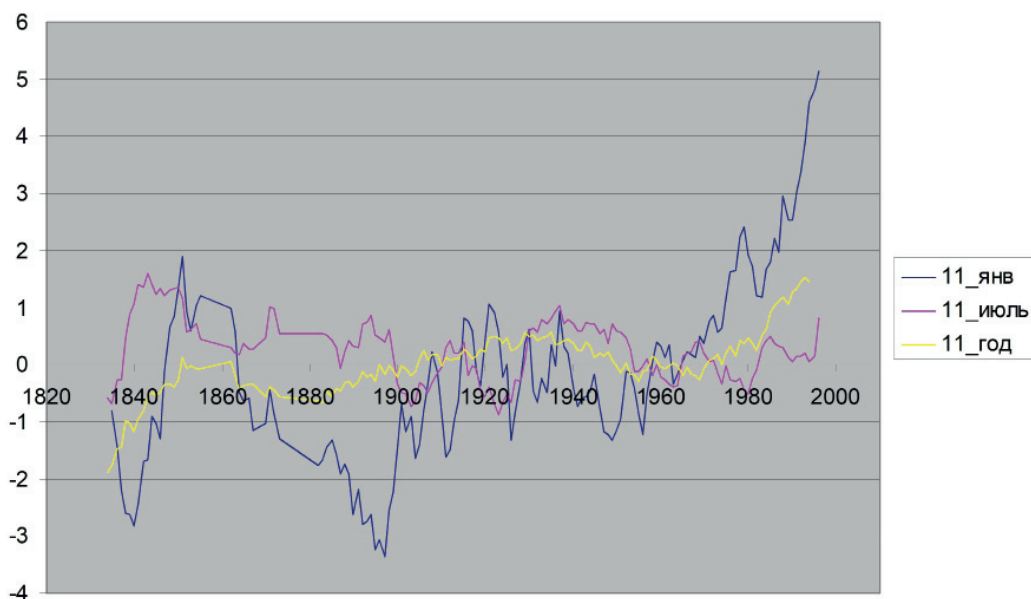


Рис. 2. Температура января, июля, года по ГМС Якутск с 1829 г. (в отклонениях от среднего)

Fig. 2. Temperature of January, July, year according to the Yakutsk UGMS since 1829 (in deviations from the average)

Охватывая почти 200-летний период – от окончания Малой ледниковой эпохи до современности, ряд ГМС Якутск показывает (см. рис. 2), что периодам холодных зим (январей) в Якутске, связанных с ослаблением циркуляции и усилением барических полей Сибирского максимума, отвечали потепления июлей и наоборот [8]. Именно поэтому похолодания бореального периода приводили к разным последствиям в Азии и Америке. В Азии, на фоне холодных зим, наблюдалось потепление летних сезонов, способствовавшее усилению вегетации растительности, в том числе в районах влажных и холодных приполярных областей. В Америке, напротив, в эти периоды развивались засухи. Это явление очевидно и нашло отражение в зеркальности шкал Фергюсона и Хантемирова.

Синхронность минимумов прироста древостоев на Ямале и в Северной Америке, приуроченных к границам всех трех 2600-летних ритмов, сопрягается с пиками регрессий уровня Каспия и совпадает с потеплениями Арктики. В Белых горах и Большом Бассейне она вызвана главным лимитирующим фактором роста сосны – повышенной сухостью воздуха (недостаток влаги), в ареале лиственницы на Ямале – низкими температурами (недостаток тепла).

В целом, высокая хронологическая согласованность минимумов 2600-летних ритмов в структуре шкал Фергюсона и Хантемирова свидетельствует в пользу единой 2600-летней матрицы голоцена, имеющей космические корни.

С позиции этой матрицы обратимся к проблеме структуры голоцена, которая, по мнению Нейштадт, имеет важное значение для обоснования долгосрочных прогнозов [19].

Хронология структуры голоцена

Минимумы шкал Фергюсона и Хантемирова, синхронно проявившиеся на границах 2600-летних ритмов 7,0 – 4,4 – 1,8 тыс. л. н., могут рассматриваться как хроностратиграфические рубежи среднего и позднего голоцена, разделяющие атлантику и суббореал, и суббореал, и субатлантику. Эти рубежи отчетливо фиксируются и в спорово-пыльцевых спектрах, полученных для голоцена Тянь-Шаня [15].

Независимый анализ палеогеографической информации по голоцену Северной Евразии и Северной Америки, показал «плавающую» шкалу этих рубежей, объясняемую влиянием региональных особенностей [19, 20]. Вместе с тем, некоторые серии опорных разрезов голоцена Северной Евразии и Северной Америки демонстрируют синхронность стратиграфических переходов с датами минимумов ствольных приростов на шкалах Фергюсона и Хантемирова. В частности, К.И. Лукашевым и В.К. Лукашевым [21], на основе изучения более 170 пыльцевых диаграмм разрезов четвертичных отложений Белоруссии, выделено семь пыльцевых зон, среди которых начало среднего голоцена определено в 7000 л.н., что полностью совпадает с рубежом начала этого периода на обеих шкалах древесно-кольцевых хронологий. В это время для Белоруссии реконструируется потепление и повышение увлажненности климата, развитие богатых по составу хвойно-широколиственных лесов; повышается уровень озер, в них более интенсивно накапливаются органические вещества, образуя илы и сапропели. Усиливается заболачивание территории и развитие низинных, верховых и переходных торфяников.

В суббореальный период – около 4500 л.н., в эпоху одной из глобальных засух голоцена (судя по древесно-кольцевой хронологии сосны остистой), уменьшается количество атмосферных осадков и увеличивается сухость климата; одновременно понижается уровень воды в озерах. В верховых торфяниках образуется пограничный горизонт. Около 3300-3400 л.н. реконструируется нарастание похолодания и увлажнения. В это время происходит повышение уровня воды в озерах, усиливаются процессы заболачивания. Именно 3400 л.н. проявилась трансгрессия Каспия, совпавшая с периодом усиления динамики ствольного прироста сосны остистой и холодно-влажным интервалом Дентона и Карлена в Северной Америке.

В 1969 г. В.П. Гричук [22] была предпринята беспрецедентная попытка дать характеристику климатических условий Северного полушария для одного хронологического среза в пределах климатического оптимума голоцена. В качестве такового была взята эпоха 5500 л.н. (от 1950 г.).

Это время соответствует середине позднего атлантического периода Европы (середина VII пыльцевой зоны в системе Фирбаса – Иверсена), а также середине эпохи между непуанским и аляскинским оледенениями в Северной Америке.

Для Европы и Малой Азии на срезе 5500 ± 200 л. н. было установлено, что климат прошлого отличался от современного значительно меньшей континентальностью (при аналогичных летних температурах температура января была на 5°C выше) и значительно большей (на целый месяц) длительностью безморозного периода. Количество атмосферных осадков при этом превышало современную норму на 60 мм (9,3 %). Временной рубеж в 5,5 тыс. л. н. при этом хорошо коррелирует с периодом усиления прироста сосны остистой на шкале Фергюсона и очень близок (в зоне допустимых отклонений ± 200 лет) к одному из интервалов прохладно-влажного климата Северной Америки, проявившемуся 5,3 тыс. л.н. согласно Дентону и Карлену. На этот временной интервал, по Р.М. Хантемирову [5], приходится один из глубоких, но непродолжительных минимумов среднелетней температуры на Ямале. Как в Северной Америке, так и в Евразии, положительные отклонения январских температур достигали максимальной величины около $+5^{\circ}\text{C}$ на широтах $58 - 59^{\circ}$ с. ш., постепенно убывая к югу и северу с максимумом отрицательных значений в -2°C выше 75° с.ш. [22].

Значения отклонений от показателей современных июльских температур имели иной характер. Максимальные положительные отклонения до $+2^{\circ}\text{C}$ фиксируются на широтах почти на 10° более высоких, чем для максимальных зимних. К югу июльская кривая, как и кривая температур января, снижается, но это снижение «несимметрично»: оно переходит через нулевое значение в европейском секторе также севернее. По направлению к околорасположенному пространству аналогия исчезает. По мнению В.П. Гричук, в этом пространстве можно предполагать положительные отклонения летних температур порядка $+2^{\circ}\text{C}$. Если принять, что приведенная интерпретация правильно отражает сущность явления, следует считать, что в эпоху 5500 л.н. севернее 75° с.ш., при более или менее незначительных среднегодовых температур, летний период был значительно теплее.

Дисгармонический ход отклонений кривых от современных значений январских и июльских температур указывает, по мнению В.П. Гричук, на существенные различия в изменениях годовой амплитуды температур Северного полушария. Сопоставление рассчитанных значений температур показывает, что в Европе и Северной Америке на широтах $57-59^{\circ}$ годовые амплитуды были меньше современных на $3-5^{\circ}$. К югу уменьшение годовых амплитуд становилось все менее значительным, а затем начиналась область их нарастания. На 35° с.ш. они были уже на $2-3^{\circ}\text{C}$ выше современных.

Аналогичная картина вырисовывается и на широтах $67 - 68^{\circ}$ с.ш., где годовые амплитуды уже не отличались от современных, а дальше происходило их нарастание. В районе полюса, по расчетам Гричук, годовая амплитуда должна была быть на 4°C выше современной.

Годовая сумма осадков имела тенденцию к повышению в северной половине Европы, на крайнем юге приатлантической части Северной Америки и на севере тихоокеанского побережья США. Областей с несомненным значительным понижением годового количества осадков, по имеющимся данным, не выявляется. Регистрируется увеличение продолжительности безморозного периода на 30-40 дней на всей территории Евразии и Северной Америки к северу от 55° с.ш.

По Н.А. Хотинскому [20], граница между атлантическим и суббореальными периодами, согласно корреляции голоценовых отложений и абсолютной хронологии схемы Блитта-Сернандера, соответствует переходу между литориновой и лимниевой стадиями развития Балтики. Она проводится на уровне падения кривой пыльцы *Ulmus*.

В разрезах Европейской части бывшего СССР падение уровня пыльцы *Ulmus* оказалось несколько моложе 4500 лет, что совпадает с минимумами прироста на дендрохронологических шкалах Фергюсона и Хантемирова, маркирующими рубеж окончания 2600-летнего ритма и

начало его новой реализации. Радиоуглеродные датировки на северо-восточной окраине России также показали, что климатический оптимум завершился здесь 4500 л.н. [23]. Границу между суббореальным и субатлантическим временем связывают с переходом от лимниевой стадии Балтийского моря к стадии Балтика около 2200 л.н. Однако на пыльцевых диаграммах средне-русского типа, как отмечает Н.А. Хотинский, эта граница не выявляется по сколько-нибудь существенным изменениям состава пыльцевых спектров и проводится примерно ниже верхнего максимума ели.

Н.А. Хотинский [20] обосновывает следующую хронологию периодизации голоцена: поздне-последнеледниковую – примерно в 10300 лет, предбореально-бореальную – 9600, бореально-атлантическую – 8000, атлантико-суббореальную – 5000–4500 и суббореально-субатлантическую – 2500–2200 лет. При этом он отмечает, что выделенные хронологические рамки нельзя произвольно менять и приспосабливать к региональным палеогеографическим схемам.

Если обратиться к древесно-кольцевым шкалам Фергюсона и Хантемирова, то из рис. 1 (а, в) видно, что, как атлантико-суббореальная, так и суббореально-субатлантическая границы голоцена Н.А. Хотинского практически совпадают с главными рубежами 2600-летних циклов прироста сосны и лиственницы. Это еще раз подтверждает ключевую роль 2600-летнего ритма Роджера Брея, записанного на дендрошкалах, в индикации истории голоцена Северной Америки и Евразии.

Наш вывод находит подтверждение и в истории уровневого режима озер Внутренней Азии. Согласно Н.И. Дорофеюк [24] в конце позднего неоплейстоцена (13000–12000 л. н.) и до начала голоцена озера Убсунурской котловины, Монгольского Алтая, Хангая, оз. Хубсугул и оз. Байкал имели более высокие уровни, чем в настоящее время. Высокие уровни около 13000 л. н. отмечены также в тибетском высокогорном оз. Sumxi и в китайских озерах в интервале 13000–10 000 л. н.

Между 10 000 и 9000 л.н. уровни озер Монголии были ниже современных. Наиболее низкими они были в раннем голоцене около 9500 л.н. Обводненность озерных котловин начала повышаться с 8000 л.н., достигнув максимальных значений в первой половине среднего голоцена 7500–6500 л.н., т.е. на пике океанической трансгрессии, нашедшей отражение в максимальных приростах сосны остистой на шкале Фергюсона. После 6500 л.н. началось асинхронное и постепенное снижение уровней озер, продолжавшееся приблизительно до 3000 л.н. Озера северной, центральной и восточной частей Монголии имели уровни, близкие к современным, начиная приблизительно с 5000–4500 л.н., а в заключительной фазе среднего голоцена (интервал 4000–3000 л. н.) они значительно понизились. На рубеже среднего и позднего голоцена (3000–2000 л. н.) выявляется временное возвращение озер к более высоким уровням, что совпадает с прохладно-влажным климатическим интервалом, активизировавшим горное оледенение в Северной Америке и усилившим динамику прироста сосны остистой. После 2000 л.н. во всех озерах Монголии гидрологические условия приблизились к современным.

В динамике растительного покрова Монголии, характеризующего изменчивость тепло- и влагообеспеченности внутриконтинентальных областей Азии, начало голоцена отвечало условиям аридного и холодного климата, обусловившего распространение криофитных степей в Монголии и соседних регионах [24].

Около 10000 л.н. сообщества таежного типа потеснили степь только в районах двух северных пределов, но эта фаза облесения оказалась довольно кратковременной: 9500–9000 л.н. При этом около 9500 л.н. на большей части территории доминировала степь, а пустыни продолжали существовать в обширной депрессии на северо-западе Монголии [24]. Расширение площади лесов и усиление позиций темнохвойных пород (*Picea* и *Abies*) в горах на севере, западе и в центре Монголии происходит между 8000 и 4000 л.н. Распространение ели свидетельствует об усилении условий увлажненности и ослаблении континентальности климата в середине голоцена.

Исследование погребенных почв на востоке Монголии показало существование влажных луговых степей на месте современных сухих также в первой половине среднего голоцена:

8000–6000 л.н. Эта эпоха хорошо согласуется с периодом потепления и повышением увлажненности климата 7000–6000 л.н. и главным экстремумом прироста сосны остистой в Северной Америке. В это время (7000–6000 л. н.) таежная растительность Монголии (*Picea*, *Pinus sibirica* и *Abies*) на севере и на западе занимала площадь большую, чем сегодня. Степь постепенно сменила пустыню и доминировала в горах на абсолютных отметках 1700–2500 м над ур. м. в центре и на западе Монголии, а отдельные пыльцевые спектры показывают увеличение древесной пыльцы *Larix*, *Picea* и *Pinus sibirica*. По мнению Н.И. Дорофеюк [24], в среднем голоцене Монгольский Алтай и Хангайское нагорье не были безлесны, для них были характерны лесостепные ландшафты с островными хвойными и смешанными лесами.

Севернее Монголии, в Прибайкалье и Забайкалье, широкое участие в составе лесов березы и ели было характерно вплоть до 6000 л.н. На склонах гор восточной экспозиции на протяжении первой половины среднего голоцена были развиты сосново-лиственничные с елью и лиственнично-сосновые леса, степи и лесостепи [25]. Максимального развития темнохвойная тайга в лесах береговых хребтов озера Байкал достигала приблизительно 9500–7500 л.н., но в интервале 7500–6500 л.н. ель и пихта полностью исчезли, в растительном покрове стали доминировать леса с господством сосны сибирской и лиственницы сибирской.

Степные сообщества оставались только в межгорных котловинах и по склонам гор южной экспозиции. В Северном Казахстане лесостепь с березовыми лесами была распространена 8600–8000 л.н., а сосна обыкновенная появилась в долинах Иртыша около 7300 л.н. На территории Внутренней Монголии распространение древесной растительности происходило между 9200 и 6500 л.н. В Северном Китае около 6000 л.н. лесная и лесостепная растительность доминировала к северу от 42° с.ш. Там сейчас распространены степи.

Переход к более гумидным условиям в среднем голоцене реконструирован на северо-западе Китая. В Джунгарской Гоби (оз. Манас, Синьцзян) 8300–6800 л.н. пустынную растительность сменили полынные степи при максимально теплом и влажном климате.

Около 4000–3000 л.н. дальнейшее усиление континентальности и аридности климата привело к сокращению лесопокрытых площадей в Монгольском Алтае, Хангае и Гобийском Алтае и доминированию степей. Таежные леса сохранялись только на севере страны, а пустынные сообщества вытеснили степь на севере Котловины Больших Озер. Состав и обилие остатков погребенной древесины, найденных в урочище Баян-Сайр в Гобийском Алтае, не оставляют сомнений в том, что лесная растительность таежного типа существовала там еще около 4500–3500 л.н., в настоящее же время доминируют степные ценозы. Исчезновение темнохвойных пород в Баян-Сайре происходит в интервале 3800–3500 л.н., а лиственницы — 2500–2000 л.н. Снижение влажности климата и похолодание на юго-востоке Русского Алтая и в Туве около 4000 л.н. также привели к распространению высокогорных тундр и криофитных степей. Усиление аридности климата и развитие степных сообществ на территории Внутренней Монголии отмечено после 2600 л.н. Растительность Монголии стала близка к современной уже около 2000 л. н. и без существенных изменений оставалась таковой до настоящего времени.

Как пишет Н. И. Дорофеюк, палеореконструкции прошлых климатических изменений продемонстрировали существование относительно синхронных региональных изменений атмосферной циркуляции. Наиболее вероятными причинами, вызывавшими изменения природной среды Внутренней Азии, в том числе и Монголии, являются: 1) укрепление или ослабление летнего муссона и западного переноса воздушных масс, обеспечивающих влажность азиатских внутренних территорий; 2) сдвиг полярного фронта к югу от его современного положения в Северной Монголии [24].

Особенности отклика климата на режим циркуляции атмосферы удалось исследовать на основе рядов инструментальных гидрометеорологических наблюдений ГМС Якутск – Центральная Якутия (Поморцев, Кашкаров, 2009) [8]. Путем прямого сопоставления кривых ходов циркуляции атмосферы в Северном полушарии в XX столетии и показателей значений

гидрометеорологических элементов (среднегодовые температуры и атмосферные осадки) ГМС Якутск было установлено, что в масштабах последнего векового цикла солнечной активности (1913-2008 гг.) проявились две теплые фазы климата: первая – на ветви подъема векового цикла (потепление Арктики 1930-х гг), и вторая – на ветви спада цикла (современная волна потепления). Они разделены холодно-влажным климатическим интервалом, пришедшимся на максимум векового цикла солнечной активности (рис. 3). Первая волна потепления развивалась на фоне усиления зональной циркуляции атмосферы, вторая – меридианной. В период ослабления циркуляции – на этапе перехода от зональной формы к меридианной – проявилась холодная и влажная фаза климата.

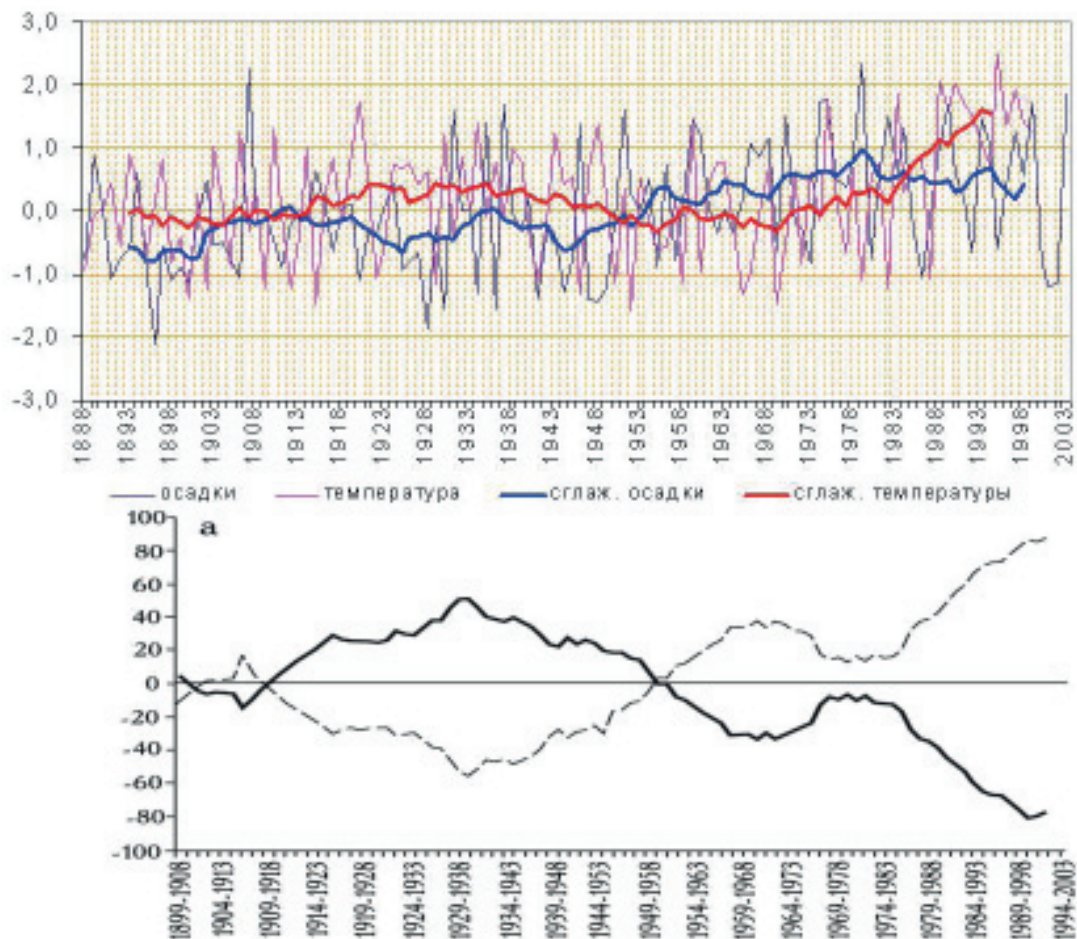


Рис. 3. Ходы зональной (сплошная линия) и меридианной (пунктир) атмосферной циркуляции в Северном полушарии (а) и среднегодовой температуры и атмосферных осадков на ГМС Якутск в масштабах векового цикла солнечной активности

Fig. 3. The movements of the zonal (solid line) and meridian (dotted line) atmospheric circulation in the Northern Hemisphere (a) and the average annual temperature and precipitation at the HMS Yakutsk on the scale of the secular cycle of solar activity

На рисунке 3 наряду с вековым ритмом отчетливо просматриваются внутривековые осцилляции, по продолжительности близкие к 22-летним. Реализация теплых, влажных и прохладных фаз задавалась особенностями глобальной циркуляции атмосферы Северного полушария.

Заключение

При всей сложности расшифровки хода природных процессов в далёком прошлом не трудно видеть, что на Земле их диктует один-единственный фактор – Космос. Преломляясь в активности Солнца и географических особенностях Земли, орбитальные вращения планет меняют силу солнечного воздействия на Землю, которую мы называем ритмами. Именно ритмы, создаваемые деятельностью Солнца и упорядоченным обращением планет вокруг него, создают на Земле хорошо выраженную периодичность в 11-22 года [26], вековую – 80-160 [27], многовековую – 2600-5200 лет [3, 4], и др. Не все источники и механизм их влияния на Землю мы понимаем сегодня до конца, и по ходу исследований остается еще много белых пятен. Очень жаль, но идеи космизма сегодня, как и раньше не находят отклика в рядах академической науки. Все – исключительно все – в области ритмов природных процессов принадлежат энтузиастам. Именно они, увидели периодичность, самой Природой запечатанную в тысячелетней летописи годовых колец деревьев и раскрывающую нам тайны тысячелетних изменений климата, колебаний уровня Мирового океана и подвижек гигантских ледовых шапок, периодически сжимающих Землю в своих объятиях. Поэтому будущее бесспорно принадлежит только тем наукам, которые поставят свои поиски на фундамент ритмики Земли и Солнца.

Особенно наглядно тесную связь Земли и Космоса раскрыли исследования механизма векового ритма Ю.Р. Ривиным [27], связавшим его проявление в земных процессах с обращением Нептуна и Плутона. Нет сомнений, что похожий механизм лежит и в основе проявления 2600-летнего ритма, с математической точностью управляющего динамикой климата Земли. Подтверждённый двумя абсолютно независимыми источниками с севера Евразии и юга Северной Америки, этот ритм открыл новые горизонты для всех наук, раскрывающих глобальные закономерности «погоды» Космоса на Земле. Только при таком созвучии могла проявиться синхронная связь всех поворотных изменений климата на всех шести континентах и обнаружиться как на суше, так и в Мировом океане.

Наши предыдущие исследования шкалы Фергюсона и 2600-летнего ритма Брея [2] существенно дополнены сегодня материалами шкалы Хантемирова и результатами региональных палеоисследований по Белоруссии, Якутии, Монголии, Китаю, Тибету. Все они согласуются с глобальными закономерностями, открытыми ранее Нейштадтом [19] Хотинским [20] Дейтоном и Карленом [9]. Разные «кирпичики» материалов разных авторов достроили до логического конца общую картину плейстоцена, созданную концепцией 1850-летнего ритма А.В. Шнитникова (1957) [13] и теорией ритмов Е.В. Максимова [14, 15]

Человечество может бесконечно продолжать бесплодные поиски закономерностей природных процессов на Земле, игнорируя их связь с Космосом. Но это направление тупиковое. Оно уводит в сторону от сути вселенских законов, открытых предшествующими цивилизациями и оставленных нам во всех древних памятниках Земли: мегалитических сооружениях, пирамидах, наскальных рисунках. Все эти памятники – суть календари или счётчики Времени, отражающие тесную связь Земли и Космоса. Никаких других часов, кроме ритмов, во Вселенной не существует. Они одинаково идут во всех Солнечных системах, но в разных часовых поясах. Поэтому, если геохронологические шкалы опираются на ритмы Вселенной, они привязаны к ходу звёздных часов и показывают связь Земли с Космосом. Если миллиарды лет земной эволюции привязаны к «потолку», они уводят человечество от сути вселенских законов и создают хаос во времени, фактах и эволюции. Непонимание этой истины будет тормозить науку до тех пор, пока на её здании человечество большими буквами не напишет безсмертные слова К.Э. Циолковского: «Абсолютная воля и власть принадлежат Космосу – и только ему одному».

Литература

1. Ferguson, C W. A 7104-Year Annual Tree-Ring Chronology For Bristlecone Pine, *Pinus Aristata*, From the White Mountains, California // *Science* 159. 1968. – P. 839-846.
2. Кашкаров, Е.П. 7104-летняя шкала Фергюсона и 2600-летний ритм / Е.П. Кашкаров, О.А. Поморцев, Н.В. Ловелиус. – Текст : непосредственный // *Rhythm Journal* – журнал РИТМ. Seattle – Иркутск, 2010. – № 6. – С. 1-20.
3. Bray, J. Roger. Glaciation and Solar Activity since the Fifth Century BC and the Solar Cycle (A combination of geophysical, biological and glaciological information supports the idea of a 2600-year solar cycle) / J. Roger Bray. – Text: unmediated // *Nature*, Vol. 1968. – P. 672-674.
4. Bray, J. Roger. Solar-Climate Relationships in the Post-Pleistocene / J. Roger Bray. – Text: unmediated // *Science*, Vol. 171 no. 3977, 1971. – P.1242-1243.
5. Хантемиров, Р.М. Динамика древесной растительности и изменения климата на севере Западной Сибири в голоцене: 03.00.16: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук: / Хантемиров Рашит Мигатович. – Екатеринбург, 2009. – 43 с. – Текст: непосредственный.
6. Хантемиров, Р. М. Изменения климата и динамика древесной растительности на Ямале в течение последних 7200 лет / Р. М. Хантемиров, С.Г.Шиятов, Л.А. Горланова, А.Ю. Сурков. – Текст: непосредственный // *Криогенные ресурсы полярных регионов: Материалы международной конференции*. – Салехард, июнь, 2007, Пушино, 2007. – Т. 1. – С. 102-105.
7. Поморцев, О.А. Биоклиматическая хронология голоцена / О.А. Поморцев, Е.П. Кашкаров, Н.В. Ловелиус. – Текст: непосредственный // *Вестник Северо-Восточного Федерального университета имени М.К. Аммосова*. – 2015. – № 3 (47). – С. 100-115.
8. Поморцев, О.А. Потепление климата в зоне Сибирского антициклона / О.А. Поморцев, Е.П. Кашкаров. – Текст: непосредственный // *Ритм – Rhythm Journal*. – 2008. – № 1. – С. 128–150.
9. Имбри, Джон Тайны ледниковых эпох / Джон Имбри, Кетрин Памела Имбри. – Москва: Прогресс, 1988. – 262 с. – Текст: непосредственный.
10. Чистяков, В.Ф. Солнечная активность и её влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука / В.Ф. Чистяков. – Текст: непосредственный // *Труды УАФО*, 2001. – Т.5, вып. 5. – 176 с.
11. Salzer, W. Matthew Recent unprecedented tree-ring growth in Bristlecone Pine at the highest elevation and possible causes / Matthew W. Salzer, Malcolm K. Hughes, Andrew G. Bunn, and Kurt F. Kipfmüller. // *Proceeding National Academy of Science USA* 2009, Dec 1;106 (48):20348-53. doi: 10.1073/pnas.0903029106. Epub 2009, Nov 1.
12. Берг, Л.С. Уровень Каспийского моря и условия плавания в Арктике / Л.С. Берг. – Текст: непосредственный // *Известия Всесоюзного географического общества*, 1943. – Т. 75, вып. 4. – С. 16–21.
13. Шнитников, А.В. Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария: Записки ГО СССР. Новая серия. Т. 16 / А.В. Шнитников. – Москва: Издательство АН СССР, 1957. – 338 с. – Текст: непосредственный.
14. Максимов, Е.В. Проблемы оледенения Земли и ритмы в природе / Е.В. Максимов. – Ленинград: ЛГУ, 1972. – 294 с. – Текст: непосредственный.
15. Максимов, Е.В. Ритмы на Земле и в Космосе / Е.В. Максимов. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГУ. – 1995. – 323 с. – Текст: непосредственный.
16. Поморцев, О.А. Ледники южного склона хр. Кунгей Ала-Тоо как индикаторы изменчивости природных условий: 11.00.01: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук: / О.А. Поморцев. – Ленинград, 1980. – 21 с. – Текст: непосредственный.
17. Алешинская, З.В. Абсолютная хронология изменчивости общей увлажненности бассейна оз. Иссык-Куль в голоцене / З.В. Алешинская, А.П. Мельникова, О.А. Поморцев. – Текст: непосредственный // *Гидрометеорологический режим и динамика озера Иссык-Куль*. – Фрунзе: Илим, 1985. – С. 37-49.
18. Некрасов, И.А., Последнее оледенение и криолитозона Южного Верхоянья / И.А. Некрасов, Е.В. Максимов, Е.В. Климовский. – Якутск: Книжное издательство, 1973. – 152 с. – Текст: непосредственный.

19. Нейдштадт, М.И. Введение / М.И. Нейдштадт. – Текст: непосредственный // Голоцен. – Москва: Наука, 1969. – С. 5-12.
20. Хотинский, Н.А. Голоцен Северной Евразии / Н.А. Хотинский. – Москва: Наука, 2007. – 200 с. – Текст: непосредственный.
21. Лукашев, К.И. Геохимическое изучение голоцена Белоруссии / К.И. Лукашев, В.К. Лукашев. – Текст: непосредственный // Голоцен. – Москва: Наука, 1969. С. 27-40.
22. Гричук, В.П. Опыт реконструкции некоторых элементов климата северного полушария в атлантический период голоцена / В.П. Гричук. – Текст: непосредственный // Голоцен. – Москва: Наука, 1969. – С. 41-57.
23. Лаврушин, Ю.А. Первые данные по абсолютной хронологии основных событий голоцена Северо-Востока СССР / Ю.А. Лаврушин, А.Л. Девирц, Р.Е. Гитерман, Н.Г. Маркова. – Текст: непосредственный // Бюллетень Комиссии по изучению Четвертичного Периода АН СССР, 1963. – № 28. – С. 27-43.
24. Дорофеюк, Н.И. Реконструкция природных условий Внутренней Азии в позднеледниковье и голоцене (по материалам диатомового и палинологического анализов озерных осадков Монголии): 03.00.16.: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук: / Дорофеюк, Н.И. – Москва, 2008. – 48 с. – Текст: непосредственный.
25. Безрукова, Е.В. Палеогеография Прибайкалья в позднеледниковье и голоцене / Е.В. Безрукова. – Новосибирск: Наука, 1999. – 126 с. – Текст: непосредственный.
26. Чижевский, А.Л. Земное эхо солнечных бурь / А.Л. Чижевский. – Москва: Мысль, 1976. – 367 с. – Текст: непосредственный.
27. Ривин, Ю.Р. О природе векового цикла солнечной активности и его отражении в геодинамических циклах / Ю.Р. Ривин. – Текст: непосредственный // Маркшейдерское дело: Электронный научно-информационный журнал, 2012. – № 3. – С. 1-7.

References

1. Ferguson, S W. A 7104-Year Annual Tree-Ring Chronology For Bristlecone Pine, *Pinus Aristata*, From the White Mountains, California // *Science* 159. 1968. – R. 839-846.
2. Kashkarov, E.P. 7104-letnjaja shkala Fergjusona i 2600-letnij ritm / E.P. Kashkarov, O.A. Pomorcev, N.V. Lovelius. – Текст : neposredstvennyj // *Rhythm Journal – zhurnal RITM*. Seattle – Irkutsk, 2010. – № 6. – S. 1-20.
3. Bray, J. Roger. Glaciation and Solar Activity since the Fifth Century BC and the Solar Cycle (A combination of geophysical, biological and glaciological information supports the idea of a 2600 year solar cycle) / J. Roger Bray. – Text: unmediated // *Nature*, Vol. 1968. – P. 672-674.
4. Bray, J. Roger. Solar-Climate Relationships in the Post-Pleistocene / J. Roger Bray. – Text: unmediated // *Science*, Vol. 171 no. 3977, 1971. – P.1242-1243.
5. Hantemirov, R.M. Dinamika drevesnoj rastitel'nosti i izmenenija klimata na severe Zapadnoj Sibiri v golocene: 03.00.16: avtoreferat dissertacii na soskanie uchenoj stepeni doktora biologicheskikh nauk: / Hantemirov Rashit Migatovich. – Ekaterinburg, 2009. – 43 s. – Текст: neposredstvennyj.
6. Hantemirov, R. M. Izmenenija klimata i dinamika drevesnoj rastitel'nosti na Jamale v techenie poslednih 7200 let / R. M. Hantemirov, S.G. Shijatov, L.A. Gorlanova, A. Ju. Surkov. – Текст: neposredstvennyj // *Kriogennye resursy poljarnyh regionov: Materialy mezhdunarodnoj konferencii*. – Salehard, ijun', 2007, Pushhino, 2007. – T. 1. – S. 102-105.
7. Pomorcev, O.A. Bioklimaticheskaja hronologija golocena / O.A. Pomorcev, E.P. Kashkarov, N.V. Lovelius. – Текст: neposredstvennyj // *Vestnik Severo-Vostochnogo Federal'nogo universiteta imeni M.K. Ammosova*. – 2015. – № 3 (47). – S. 100-115.
8. Pomorcev, O.A. Poteplenie klimata v zone Sibirskogo anticiklona / O.A. Pomorcev, E.P. Kashkarov. – Текст: neposredstvennyj // *Ritm – Rhythm Journal*. – 2008. – № 1. – S. 128–150.
9. Imbri, Dzhon Tajny lednikovyh jepoh / Dzhon Imbri, Ketrin Pamela Imbri. – Moskva: Progress, 1988. – 262 s. – Текст: neposredstvennyj.

10. Chistjakov, V.F. Solnechnaja aktivnost' i ejo vlijanie na Zemlju. Vladivostok: Dal'nauka / V.F. Chistjakov. – Tekst: neposredstvennyj // Trudy UAFO, 2001. – T.5, vyp. 5. – 176 s.
11. Salzer, W. Matthew Recent unprecedented tree-ring growth in Bristlecone Pine at the highest elevation and possible causes / Matthew W. Salzer, Malcolm K. Hughes, Andrew G. Bunn, and Kurt F. Kipfmüller. // Proceeding National Academy of Science USA 2009, Dec 1;106 (48):20348-53. doi: 10.1073/pnas.0903029106. Epub 2009, Nov 1.
12. Berg, L.S. Uroven' Kaspijskogo morja i uslovija plavanija v Arktike / L.S. Berg. – Tekst: neposredstvennyj // Izvestija Vsesojuznogo geograficheskogo obshhestva, 1943. – T. 75, vyp. 4. – S. 16–21.
13. Shnitnikov, A.V. Izmenchivost' obshhej uvlazhnennosti materikov Severnogo polusharija: Zapiski GO SSSR. Novaja serija. T. 16 / A.V. Shnitnikov. – Moskva: Izdatel'stvo AN SSSR, 1957. – 338 s. – Tekst: neposredstvennyj.
14. Maksimov, E.V. Problemy oledeneniya Zemli i ritmy v prirode / E.V. Maksimov. – Leningrad: LGU, 1972. – 294 s. – Tekst: neposredstvennyj.
15. Maksimov, E.V. Ritmy na Zemle i v Kosmose / E.V. Maksimov. – Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo SPbGU. – 1995. – 323 s. – Tekst: neposredstvennyj.
16. Pomorcev, O.A. Ledniki juzhnogo sklona hr. Kungej Ala-Too kak indikatory izmenchivosti prirodnyh uslovij: 11.00.01: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geograficheskikh nauk: / O.A. Pomorcev. – Leningrad, 1980. – 21 s. – Tekst: neposredstvennyj.
17. Aleshinskaja, Z.V. Absolutnaja hronologija izmenchivosti obshhej uvlazhnennosti bassejna oz. Issyk-Kul' v golocene / Z.V. Aleshinskaja, A.P. Mel'nikova, O.A. Pomorcev. – Tekst: neposredstvennyj // Hidrometeorologicheskij rezhim i dinamika ozera Issyk-Kul'. – Frunze: Ilim, 1985. – S. 37-49.
18. Nekrasov, I.A., Poslednee oledenenie i kriolitozona Juzhnogo Verhojan'ja / I.A. Nekrasov, E.V. Maksimov, E.V. Klimovskij. – Jakutsk: Knizhnoe izdatel'stvo, 1973. – 152 s. – Tekst: neposredstvennyj.
19. Nejdshadt, M.I. Vvedenie / M.I. Nejdshadt. – Tekst: neposredstvennyj // Golocen. – Moskva: Nauka, 1969. – S. 5-12.
20. Hotinskij, N.A. Golocen Severnoj Evrazii / N.A. Hotinskij. – Moskva: Nauka, 2007. – 200 s. – Tekst: neposredstvennyj.
21. Lukashev, K.I. Geohimicheskoe izuchenie golocena Belorussii / K.I. Lukashev, V.K. Lukashev. – Tekst: neposredstvennyj // Golocen. – Moskva: Nauka, 1969. S. 27-40.
22. Grichuk, V.P. Opyt rekonstrukcii nekotoryh jelementov klimata severnogo polusharija v atlanticheskij period golocena / V.P. Grichuk. – Tekst: neposredstvennyj // Golocen. – Moskva: Nauka, 1969. – S. 41-57.
23. Lavrushin, Ju.A. Pervye dannye po absolutnoj hronologii osnovnyh sobytij golocena Severo-Vostoka SSSR / Ju.A. Lavrushin, A.L. Devirc, R.E. Giterman, N.G. Markova. – Tekst: neposredstvennyj // Bjulleten' Komissii po izucheniju Chetvertichnogo Perioda AN SSSR, 1963. – № 28. – S. 27-43.
24. Dorofejuk, N.I. Rekonstrukcija prirodnyh uslovij Vnutrennej Azii v pozdnelednikov'e i golocene (po materialam diatomovogo i palinologicheskogo analizov ozernyh osadkov Mongolii): 03.00.16.: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora biologicheskikh nauk: / Dorofejuk, N.I. – Moskva, 2008. – 48 s. – Tekst: neposredstvennyj.
25. Bezrukova, E.V. Paleogeografija Pribajkal'ja v pozdnelednikov'e i golocene / E.V. Bezrukova. – Novosibirsk: Nauka, 1999. – 126 s. – Tekst: neposredstvennyj.
26. Chizhevskij, A.L. Zemnoe jeha solnechnyh bur' / A.L. Chizhevskij. – Moskva: Mysl', 1976. – 367 s. – Tekst: neposredstvennyj.
27. Rivin, Ju.R. O prirode vekovogo cikla solnechnoj aktivnosti i ego otrazhenii v geodinamicheskikh ciklah / Ju.R. Rivin. – Tekst: neposredstvennyj // Markshejderskoe delo: Jelektronnyj nauchno-informacionnyj zhurnal, 2012. – № 3. – S. 1-7.

Сведения об авторах

ПОМОРЦЕВ Олег Александрович – к. г. н., доцент по кафедре мерзлотоведения, доцент кафедры «Прикладная геология» геологоразведочного факультета СВФУ им. М.К. Аммосова, e-mail: olegpomortsev@mail.ru

POMORTSEV Oleg Aleksandrovich – Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor of the Permafrost Science Department, Associate Professor of Applied Geology Department, Geological Prospecting Faculty, M. K. Ammosov North Eastern Federal University, e-mail: olegpomortsev@mail.ru

КАШКАРОВ Евгений Петрович – к. г. н., н. с. отдела биогеографии Международного института исследования ритмов, e-mail: e.kashkarov@gmail.com

KASHKAROV Eugene Petrovich – Candidate of Geographic Sciences, Research Scientist of Biogeography Department, International Rhythm Research Institute, e-mail: e.kashkarov@gmail.com

ЛОВЕЛИУС Николай Владимирович – д. б. н., проф., в. н. с. лаборатории географии и природоиспользования Института озераведения РАН, e-mail: lake@limno.org.ru

LOVELIUS Nikolai Vladimirovich – Doctor of Biological Sciences, Professor, Senior Research Scientist of Geography and Nature Management Laboratory, Limnology Institute of RAS, e-mail: lake@limno.org.ru

*Ю. Ф. Рожков¹, М. Ю. Кондакова²*¹ Государственный заповедник «Олекминский», г. Олекминск, Россия² Гидрохимический институт», г. Ростов-на-Дону, Россия

e-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru

e-mail: vesna-dm@mail.ru

ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕСОВ ПОСЛЕ ПОЖАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕГМЕНТАЦИИ И КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА СНИМКОВ LANDSAT

Аннотация. Для целей мониторинга состояния лесных экосистем наиболее эффективно использование возможностей дистанционных методов. На мультиспектральных космических снимках Landsat (временная серия летних снимков за 1995, 2000, 2004, 2008, 2013, 2016 гг.) территории государственного природного заповедника «Олекминский» выделены фрагменты площадью 250 км² (масштаб 1:5000). Затем были сохранены полигоны по трем уровням сегментации- 4, 16, 64 с масштабами, 1:2500, 1:1250, 1:625. При дешифрировании проводилась неуправляемая классификация полигонов методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) на 2,4,10 классов. Были построены кривые распределения значений индекса лесистости для полигонов 3 уровня сегментации. Результаты классификации на 4 класса использовались при расчете тематической разности пикселей. По результатам классификации на 4,10 классов была проведена статобработка с расчетом показателей разности и подобия полигонов – дисперсии генеральной совокупности и теста Фишера (F-тест). Описан способ определения нарушенности экосистем и их восстановления по кривым распределения индекса лесистости. Рассмотрены результаты изменения дисперсии генеральной совокупности и F-теста на разных уровнях сегментации и на разных этапах восстановления лесов. Определены особенности перехода между тремя уровнями самоподобия (скейлинг) мультифрактальных структур по мере восстановления лесов.

Ключевые слова: дешифрирование временной серии космических снимков, классификация Isodata, индекс лесистости, тематическая разность пикселей, дисперсия, F-тест, скейлинг мультифрактальных структур.

*Yu. F. Rozhkov¹, M. Yu. Kondakova²*¹ State Nature Reserve» Olyokminsky «, Olyokminsk, Russia² Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

e-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru

e-mail: vesna-dm@mail.ru

AN ASSESSMENT OF FOREST RESTORATION AFTER FIRE USING SEGMENTATION AND CLUSTER ANALYSIS OF LANDSAT IMAGES

Abstract. For the purposes of monitoring the state of forest ecosystems, it is most effective to use the capabilities of remote methods. Fragments with an area of 250 km² (scale 1:5000) were identified on Landsat multispectral satellite images (time series of summer images for 1995, 2000, 2004, 2008, 2013, 2016) of the Olyokminsky State Nature Reserve. Then polygons were saved at three levels of segmentation: 4, 16, 64 with the scales of 1:2500, 1:1250, 1:625. When deciphering, an unmanaged classification of polygons was carried out using the ISODATA method (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) into 2, 4, 10 classes. Distribution curves for the values of the forest cover index for polygons of the 3rd level of segmentation were constructed. The results of classification into 4 classes were used to calculate the thematic pixel difference. According to the classification results for 4.10 classes, statistical processing was carried out with the calculation of the difference and similarity indicators of polygons, the dispersion of the general population and the Fisher test (F-test). A method is described for determining the disturbance of ecosystems and their restoration from the distribution curves of the forest cover

index. The results of the change in the dispersion of the general population and the F-test at different levels of segmentation and at different stages of forest restoration are considered. The features of the transition between three levels of self-similarity (scaling) of multifractal structures as forests are restored are determined.

Keywords: satellite image time series interpretation, Isodata classification, forest cover index, thematic pixel difference, F-test, scaling of multifractal structures satellite image interpretation, Isodata classification, forest cover index, dispersion, F-test.

Введение

Для целей мониторинга состояния лесных экосистем наиболее эффективно использование возможностей дистанционных методов. В качестве реперов для оценки сохранности биоразнообразия лесов могут служить такие параметры, как общая лесистость, фрагментация лесного покрова, доля вторичных (мелколиственных) лесов, развитие антропогенной инфраструктуры и доля охраняемых территорий разного подчинения [1, 2]. Дистанционные методы анализа космических снимков используются при определении основных таксационно-дешифровочных показателей [3-6], трехмерном моделировании структуры и динамики таежных ландшафтов [7], почвенно-растительного покрова [8]. Важным методом изучения структуры экосистем на космическом снимке является метод сегментации изображений [9-11]. Он позволяет анализировать мультифрактальную структуру изображений и фрактальное самоподобие (скейлинг) [12, 13]. В качестве инструментов дешифрирования широко распространен кластерный анализ [14, 15].

Целью настоящего исследования является оценка восстановления лесов после пожара с использованием инструментов сегментации и кластерного анализа космических снимков Landsat.

Материалы и методы исследований

При осуществлении непрерывного мониторинга за состоянием бореальных лесов использовалось дешифрирование временной серии летних снимков Landsat, находящихся в свободном доступе на сайте Earth Explorer. Временная серия состояла из четырех летних (июль-август) мультиспектральных снимков (восьмиканальный радиометр ETM+) Landsat7 за 1995, 2000, 2004, 2008 гг. и двух летних (июль) мультиспектральных снимков (десятиканальный сканирующий радиометр OLI) Landsat8 за 2013 и 2016 гг. Для анализа были выбраны полигоны с гарью пожара 1985 года на разных этапах лесовосстановления: 1995, 2000, 2004, 2008, 2013 и 2016 гг. Исследования проводились на территории Олекминского заповедника Юго-Западной Якутии. Для сравнения был выбран исходный полигон площадью 250.0 км² (масштаб 1:5000) с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.) (рис.1). При проведении сегментации на первом уровне исходный полигон был разбит на четыре полигона масштаба 1:2500. Далее были получены 16 полигонов с масштабом 1:1250. Способ получения полигонов разных масштабов описан ранее [16,17]. На третьем уровне сегментации продолжалось разбиение на тетрады. Получилось 64 полигона масштаба 1:625 и площадью 4.0 км² (рис. 2).

При обработке космических снимков использовался пакет программ ENVI-4.0 (для преобразования снимков в формат Geotif), ArcView-3.3 с модулями Image Analyst, Spatial Analyst (для дешифрирования полученных снимков). В качестве показателя, с помощью которого осуществлялся мониторинг состояния лесов, были выбран инструмент кластерного анализа: классификация ISODATA [18]. Была проведена классификация снимков на 2,4,10 классов. В основу инструмента неуправляемой классификации мультиспектральных снимков заложен метод кластерного анализа ISODATA, который использует установленное число итераций (перегруппировка пикселей по классам) и порог сходимости для выбранных классов. Выбранный метод классификации является самоорганизующимся, так как исследователь указывает только количество классов, на которые нужно разбить весь массив данных (в данном случае пикселей). При проведении классификации по методу ISODATA программой в первую очередь учитывается значение спектральной яркости и классы формируются в группы по увеличению спектральной

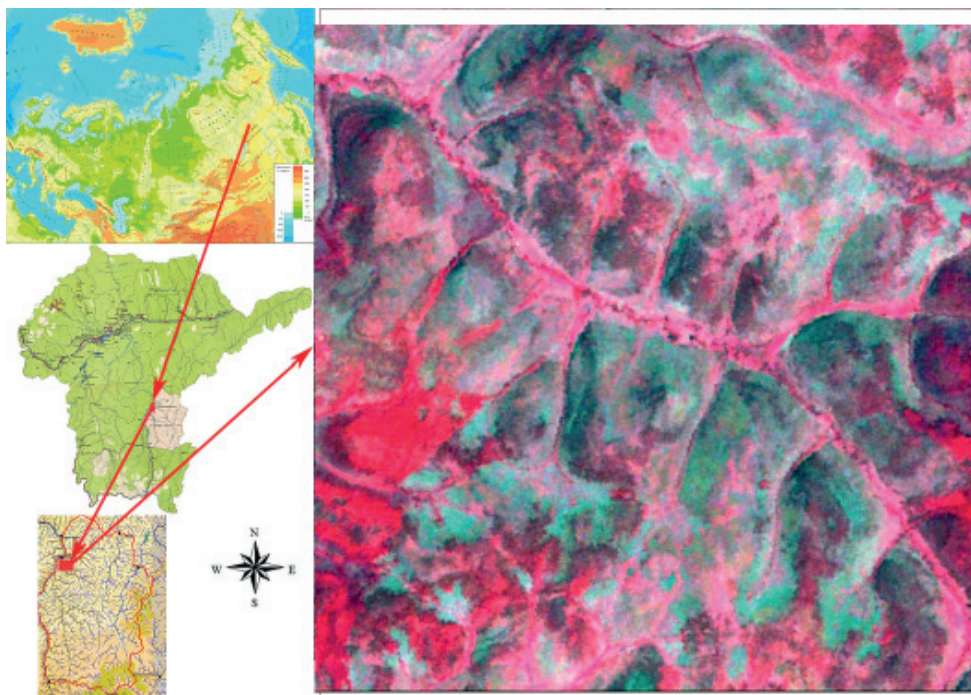


Рис. 1. Район исследования

Fig. 1. Study area

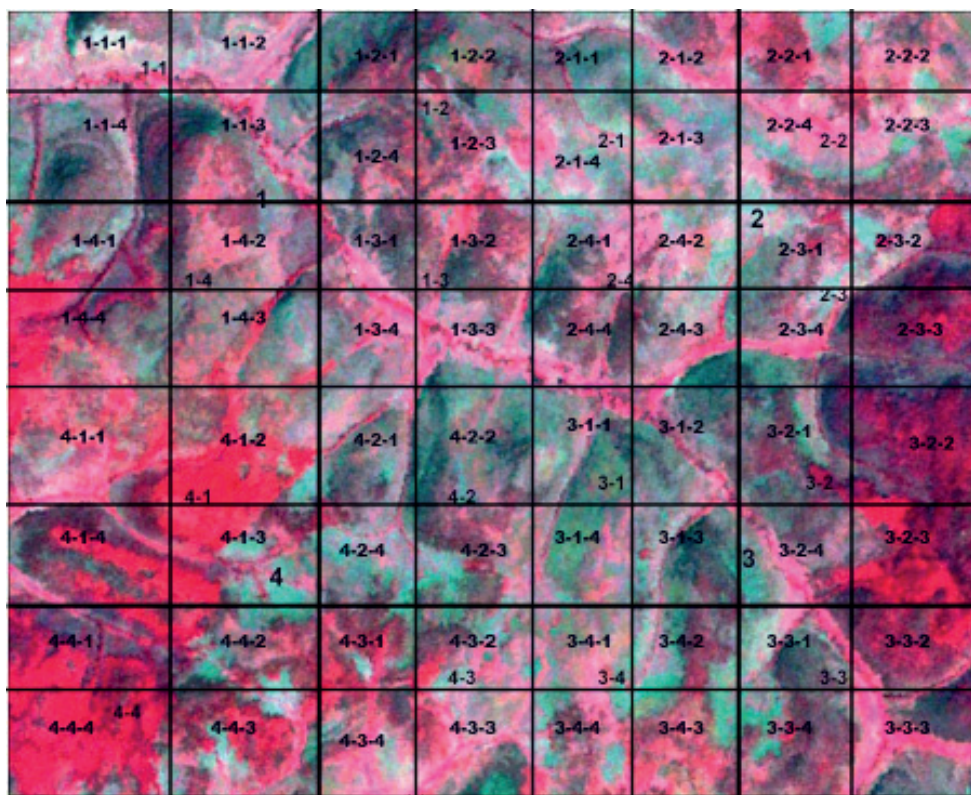


Рис. 2. Разбивка фрагмента снимка Landsat масштаба 1:5000 на полигоны (4, 16, 64 полигона)

Fig. 2. Splitting a fragment of a Landsat image at a scale of 1:5000 into polygons (4, 16, 64 polygons)

яркости. Визуально, при классификации на два класса в первый класс – включены пиксели с малыми значениями спектральной яркости отраженного света (он представлен темным цветом), во второй класс – пиксели с большими значениями спектральной яркости (он представлен белым цветом). При классификации на 2 класса пиксели распределены в соотношении 50 на 50 %.

При увеличении количества классов появляются классы с промежуточными значениями спектральной яркости, но при этом сохраняется симметрия распределения пикселей. Классификация на 4 класса позволяет разделить все пиксели анализируемой площади на 4 группы по возрастанию спектральной яркости с шагом в 25 %. Классификация на 10 классов позволяет распределить все пиксели на 10 групп по возрастанию спектральной яркости с шагом 10 %.

Классификация на два класса позволяет определить индекс, характеризующий лесистость [2], который определяется как отношение площади, покрытой лесной растительностью, к общей площади: $D = df/S$, где: D – лесистость; df – площадь, покрытая лесной растительностью, м²; S – общая площадь территории, м². Классификация на 4, 10 классов была использована при статистическом анализе. Проводилось сравнение полигонов с расчетом их разности и подобия – по дисперсии генеральной совокупности, тесту Фишера (F-тест). До проведения статистического анализа все результаты определения классификации за все годы были пересчитаны и приведены к размерности полигона масштаба 1:1250. Результаты пересчета результатов классификации на всех трех уровнях сегментации представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты пересчета результатов классификации снимка Landsat на 10 классов для разных масштабов

Номер полигона	1=1-2	1=1-3	1=1-4	1=1-1	1-1	25-1	50-1
масштаб	1:625	1:625	1:625	1:625	1:1250	1:2500	1:5000
1 кл.	576	332	683	823	141	198	348
2кл.	1339	1063	452	336	1317	1367	1051
3 кл	887	979	1886	1623	1576	1276	1129
4 кл	1055	1459	1750	560	940	1578	1742
5 кл.	1327	1339	1019	1958	1704	1122	1347
6 кл	1263	1563	1715	1619	1542	1161	1738
7 кл	1327	831	703	811	725	1706	979
8 кл.	935	1874	476	1323	1052	970	871
9 кл	743	803	1447	995	1184	312	679
10 кл.	927	136	248	332	198	690	496
Сумма пикселей	10379	10379	10379	10379	10379	10379	10379

Результаты и обсуждение

Оценка изменений нарушенности лесных экосистем в процессе восстановления от пожаров по кривым распределения индекса лесистости. Ранее нами было показано, что с помощью сегментации [19] можно оценить нарушенность лесных экосистем после разрушительных воздействий (в данном случае, после лесных пожаров).

Ненарушенные экосистемы имеют нормальный характер (гауссова) распределения значений индекса лесистости. Что согласуется с утверждением [20], согласно которому в случае параметрических способов классификации используют закон нормального (гауссова) распределения, типичного для яркостей природных объектов. Тогда как у нарушенных экосистем

закон нормального (гауссова) распределения не действует. На рис.3 показана динамика восстановления лесных экосистем после пожара. Кривые распределения становятся близкими к нормальному по мере восстановления экосистемы после пожара. Спустя 10 и 19 лет после пожара кривые распределения значений индекса лесистости не подчиняются закону нормального распределения (рис. 3 А, В). Через 23 и 31 год после пожара кривые распределения значений индекса лесистости приближаются к кривым нормального(гауссова) распределения (рис. 3 С, D). С помощью тестов на нормальность распределения (R-статистика Shapiro-Wilk normality test) определены следующие значения: 2008 г.- $W=0.88543$, $p\text{-value}=0.2424$; 2013 г.- $W=0.84996$, $p\text{-value}=0.16663$; 2016 г.- $W=0.80276$, $p\text{-value}=0.18007$.

А



В



С



D

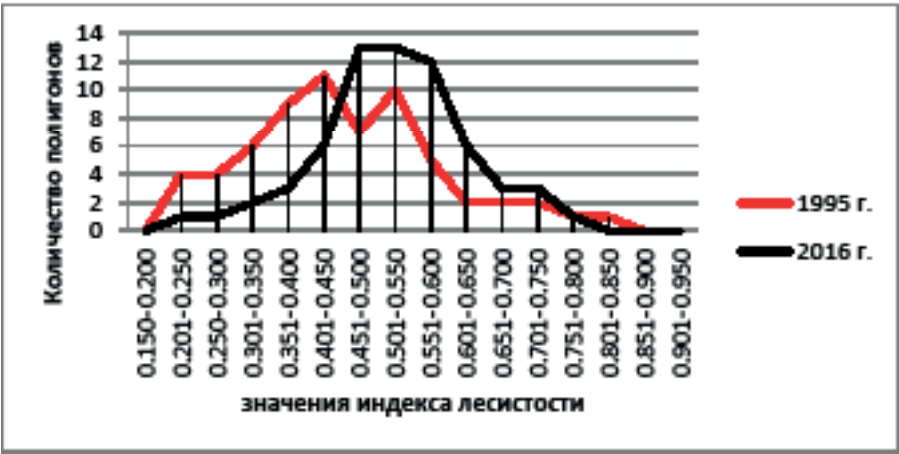


Рис.3. Изменение кривых распределения значений индекса лесистости по мере восстановления лесов после пожара (64 полигона). А- 1995-2000 гг.; В- 1995-2004 гг.; С- 1995-2008 гг.; D- 1995-2016 гг.

Fig.3. Changes in the distribution curves of forest cover index values as forests recover after a fire (64 polygons). A – 1995-2000; B- 1995-2004; C- 1995-2008; D- 1995-2016

Оценка динамики восстановления лесов после пожара с помощью регрессионного анализа. Ранее [18] нами было показано, что наиболее нарушенные после пожара полигоны восстанавливаются с большей интенсивностью, чем слабонарушенные. Все полигоны, полученные в результате сегментации, были разделены на три группы по значениям индекса лесистости в 1995 году. Сильнонарушенные- со значениями индекса – 0.200-0.350; среднена-рушенные- 0.350- 0.450; малонарушенные – свыше 0.500. Были рассчитаны средние значения ин-дексов лесистости этих трех групп полигонов по годам (n=7 в каждой группе). Распределение значений индексов лесистости показано в таблице 2.

Таблица 2 – Связь между индексом лесистости и интенсивностью восстановления лесов

Год	Сильнонарушенные (badly disturbed)	Среднена-рушенные (moterately disturbed)	Малонарушенные (little disturbed)
1995	0.257	0.383	0.565
2000	0.311	0.441	0.602
2004	0.365	0.460	0.604
2008	0.419	0.520	0.607
2013	0.442	0.521	0.619
2016	0.459	0.534	0.628

Были определены коэффициенты трех уравнений линейной регрессии для сильно-, средне-, малонарушенных полигонов. Уравнения регрессии выглядят следующим образом:

Сильнонарушенные полигоны – $Y = 0.009869 \cdot X - 4.22570$,
Среднена-рушенные полигоны – $Y = 0.007035 \cdot X - 3.635774$,
Малонарушенные полигоны – $Y = 0.00214 \cdot X - 3.68893$.

Исходя из значений коэффициентов уравнений, можно сделать вывод, что сильнонарушен-ные полигоны восстанавливаются в 4.6 раз интенсивнее, чем малоонарушенные.

Анализ межгодовой динамики соотношения площадей, покрытых лесом территорий и по-слепожарных пустошей показал, что до 2004 года преобладали площади, занятые послепожар-ными пустошами, а с 2008 года отмечено преобладание покрытых лесом площадей (рис. 4).

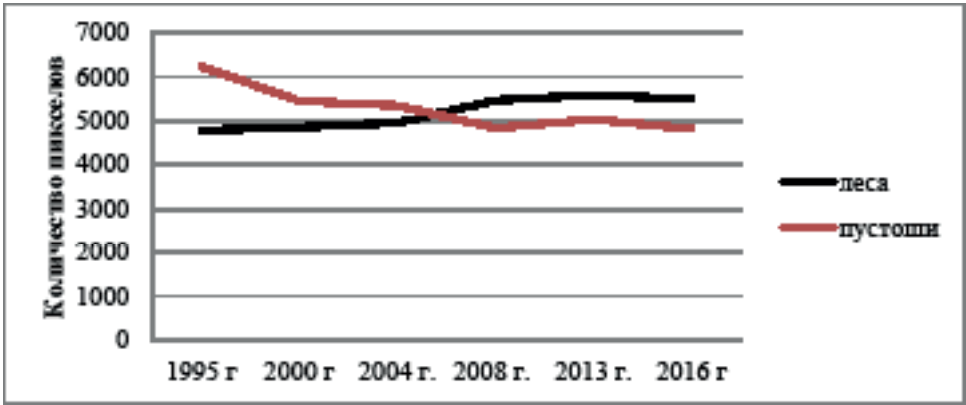


Рис. 4. Изменение соотношения между покрытой лесом территорией и послепожарными пустошами по мере восстановления после пожара за период с 1995 по 2016 гг.

Fig. 4. Change in the ratio between forested area and post-fire wasteland as post-fire recovery progressed from 1995 to 2016

Такая же картина наблюдается при сравнении результатов определения индекса лесистости полигонов второго уровня сегментации (16 полигонов) (табл. 3). До 2004 года преобладали полигоны с доминированием послепожарных пустошей (значения индекса менее 0.500), тогда как после 2008 года преобладали покрытые лесом территории.

Таблица 3 – Межгодовая динамика индекса лесистости полигонов второго уровня сегментации (16 полигонов)

Год/полигоны	индекс лесистости до 0.500	индекс лесистости более 0.500
1995 г.	12	4
2000 г.	9	7
2004 г.	9	7
2008 г.	7	9
2013 г.	6	10
2016 г.	4	12

Сравнение полигонов первого уровня сегментации показало, что из четырех полигонов наиболее нарушен полигон 2, а наименее нарушен полигон 4. По значениям индекса лесистости полигон 4 весь исследуемый период имел значения индекса лесистости более 0.500, что говорит о преобладании покрытой лесом территории над нарушенной после пожара (табл. 4). Тогда как, для полигона 2 в течение всего исследуемого периода характерны значения индекса лесистости менее 0.500, что говорит о преобладании площадей послепожарных пустошей.

Таблица 4 – Межгодовая динамика индекса лесистости полигонов первого уровня сегментации

Год/полигон	1995 г.	2000 г.	2004 г.	2008 г.	2013 г.	2016 г.
полигон 1	0.434	0.462	0.472	0.522	0.524	0.525
полигон 2	0.359	0.368	0.392	0.449	0.453	0.474
полигон 3	0.403	0.447	0.465	0.526	0.533	0.565
полигон 4	0.526	0.549	0.553	0.564	0.582	0.588

Сравнение полигонов лесного массива с помощью статистических методов. Каждый полигон тетрады с масштабом 1:625, 1:1250, 1:2500, 1:5000 подвергался обработке с определением дисперсии генеральной совокупности и F-теста на подобие. Проводилось определение статистических характеристик каждого полигона по уровням сегментации. Каждый полигон масштаба 1:625 последовательно сравнивался с полигонами масштаба 1:1250, 1:2500 и исходным полигоном масштаба 1:5000. Сравнение изменений значений дисперсии результатов классификации полигонов по мере восстановления лесов после пожара показало, что дисперсия увеличивается во времени. В случае исходных полигонов масштаба 1:5000 при классификации на четыре класса за период с 1995 г. по 2016 г. увеличение более чем в 4 раза (с 93121 до 484051), при классификации на 10 классов увеличение также почти в 4 раза (с 45614 до 153027). (табл. 5). При проведении сегментации исходных полигонов на тетрады, тенденция увеличения дисперсии полигонов во времени сохраняется для каждого из полигонов первой тетрады.

Кроме того, сравнение значений дисперсии результатов классификации на четыре и десять классов показало, что дисперсия для четырех классов классификации не менее чем в 2-4 раза превышает дисперсию при классификации этих же полигонов на десять классов.

Объяснением подобного изменения дисперсии во времени может быть увеличение разнообразия биотопов по мере восстановления от пожара за счет зарастания послепожарных пустошей. Происходит возобновление лесов, увеличение доли вторичных лесов, увеличение доли молодняка и кустарников и др.

Таблица 5 – Изменения дисперсии при классификации на 4 и 10 классов по мере восстановления лесов

Год/полигон	1995 г.	2008 г.	2016 г.	1995 г.	2004 г.	2008 г.	2013 г.	2016 г.
	Исходные полигоны, 4 класса			Исходные полигоны, 10 классов				
50-1	93121	470014	484051	45614	42847	53253	66112	153027
	Первый уровень сегментации, 4 класса			Первый уровень сегментации, 10 классов				
1	241045	449052	611558	54446	63959	136892	143962	185638
2	371049	392318	480861	49394	51169	81260	85385	90565
3	158491	164856	312093	58453	61752	63160	66591	72335
4	84450	397072	606440	47706	62292	77990	104435	140851

Оценка изменений мультифрактальной структуры в процессе восстановления лесов от пожара. В работах Б.Б. Мандельброта [21, 22] рассматривается фрактальная структура организации как самих растений, так и растительных сообществ основанная на принципе самоподобия. Ранее [17] нами было показано, что сегментация на четыре уровня структурной организации (когда исходный полигон с помощью сегментации был разделен на 4, 16, 64, 256 фрагментов) позволяет определить фрактальное самоподобие (скейлинг) – повторение фракталом самого себя на разных масштабных уровнях. Переходы между уровнями самоподобия можно оценить с помощью дисперсии, вернее разности дисперсий разных уровней. Были сформулированы четыре правила перехода между уровнями самоподобия. В настоящем исследовании сравниваются переходы между тремя уровнями самоподобия (когда исходный полигон сегментируется на 4, 16, 64 фрагмента) по мере восстановления лесов после пожара. В качестве показателя для сравнения переходов между уровнями самоподобия в разные годы может служить частное от деления дисперсии исходного полигона на дисперсии полигонов всех уровней сегментации и на разность дисперсий (табл. 6, 7, 8, 9). Были построены кривые распределения частных от деления дисперсии исходного полигона и дисперсий полигонов 3 уровня сегментации (64 полигона) по годам. Сравнивались кривые распределения для 1995, 2008, 2016 гг.

(рис. 5, 6). По характеру кривых распределения видно, что по мере восстановления лесов сужается диапазон дисперсий (и соответственно, частных от деления дисперсий). Если в 1995 году диапазон частных от деления дисперсий занимал всю шкалу значений (рис. 5) от 0 до 5.0, то в 2008 году он сужался до 4.0, а в 2016 году занимал диапазон от 0 до 1.5. При классификации на 4 класса (рис. 6) в 1995 году вообще отсутствует какая-либо упорядоченность в распределении значений дисперсий по всей шкале от 0 до 13.0. В 2008 и 2016 гг. упорядоченность в распределении дисперсий появляется и отмечается также сужение диапазона в 2016 году, в сравнении с 2008 годом. От 3.5 до 2.5.

Таблица 6 – Сравнение дисперсий и разности дисперсий третьего уровня сегментации полигона 1 в 2016 году

№ полигона	дисперсия	дисперсия с полигоном 1-1,1-2,1-3, 1-4	разность дисперсий	дисперсия с полигоном 1	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном
1=1-1	249657	254098	-2701	256799	58796	198003
1=1=2	105165	181851	-2701	184553	58796	125757
1=1=3	151540	205039	-2701	207740	58796	148944
1=1=4	159808	209173	-2701	211874	58796	153078
1=2-1	290770	272778	-4577	277355	58796	218559
1=2-2	140209	197497	-4577	202074	58796	143279
1=2-3	89727	172256	-4577	176833	58796	118037
1=2-4	178982	216884	-4577	221461	58796	162665
1=3-1	267219	249288	-16291	265579	58796	206784
1=3-2	260925	246141	-16291	262432	58796	203637
1=3-3	166615	198986	-16291	215278	58796	156482
1=3-4	122676	177017	-16291	193308	58796	134512
1=4-1	194750	189750	-39595	229345	58796	170549
1=4-2	60151	122451	-39595	162046	58796	103250
1=4-3	119259	152004	-39595	191599	58796	132803
1=4-4	194788	189769	-39595	229364	58796	170568

Таблица 7 – Частное от деления дисперсии исходного полигона и дисперсий и разности дисперсий третьего уровня сегментации полигона 1 в 2016 году

№ полигона	дисперсия	дисперсия полигонов 1-1,1-2,1-3, 1-4	разность дисперсий	дисперсия с полигоном 1	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном
1=1-1	1.71	1.73	-0.02	1.75	0.40	1.35
1=1=2	0.72	1.24	-0.02	1.26	0.40	0.85
1=1=3	1.04	1.40	-0.02	1.41	0.40	1.02
1=1=4	1.09	1.42	-0.02	1.45	0.40	1.05
1=2-1	1.99	1.86	-0.03	1.89	0.40	1.49
1=2-2	0.96	1.35	-0.03	1.38	0.40	0.98
1=2-3	0.61	1.17	-0.03	1.21	0.40	0.81
1=2-4	1.22	1.48	-0.03	1.51	0.40	1.11
1=3-1	1.82	1.70	-0.11	1.81	0.40	1.41
1=3-2	1.78	1.68	-0.11	1.79	0.40	1.39
1=3-3	1.13	1.36	-0.11	1.47	0.40	1.07
1=3-4	0.83	1.21	-0.11	1.32	0.40	0.92
1=4-1	1.33	1.30	-0.27	1.57	0.40	1.17
1=4-2	0.41	0.84	-0.27	1.11	0.40	0.71
1=4-3	0.81	1.03	-0.27	1.31	0.40	0.92
1=4-4	1.33	1.29	-0.27	1.57	0.40	1.17

Таблица 8 – Сравнение дисперсий и разности дисперсий третьего уровня сегментации полигона 1 в 1995 году

№ полигона	дисперсия	дисперсия с полигонами 1-1,1-2,1-3, 1-4	разность дисперсий	дисперсия с полигоном 1	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном
1=1-1	145045	134215	34470	99745	4416	95329
1=1=2	155249	139317	34470	104847	4416	100431
1=1=3	114766	119076	34470	84606	4416	80190
1=1=4	172601	147993	34470	113523	4416	109107
1=2-1	41954	60521	12321	48200	4416	43784
1=2-2	114396	96742	12321	84421	4416	80005
1=2-3	81839	80464	12321	68143	4416	63727
1=2-4	272138	175613	12321	163292	4416	158876
1=3-1	125215	131749	41918	89830	4416	85414
1=3-2	146584	142433	41918	100515	4416	96099
1=3-3	192349	165316	41918	123397	4416	118981
1=3-4	148166	143224	41918	101306	4416	96890
1=4-1	132105	121786	28511	93275	4416	88859
1=4-2	164371	137919	28511	109408	4416	104992
1=4-3	233655	172561	28511	144051	4416	139635
1=4-4	131239	121353	28511	92842	4416	88426

Таблица 9 – Частное от деления дисперсии исходного полигона и дисперсий и разности дисперсий третьего уровня сегментации полигона 1 в 1995 году

№ полигона	дисперсия	дисперсия с полигонами 1-1, 1-2,1-3, 1-4	разность дисперсий	дисперсия с полигоном 1	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном
1=1-1	3.18	2.94	0.76	2.19	0.10	2.09
1=1=2	3.40	3.05	0.76	2.30	0.10	2.20
1=1=3	2.52	2.61	0.76	1.85	0.10	1.76
1=1=4	3.78	3.24	0.76	2.49	0.10	2.39
1=2-1	0.92	1.33	0.27	1.06	0.10	0.96
1=2-2	2.51	2.12	0.27	1.85	0.10	1.75
1=2-3	1.79	1.76	0.27	1.49	0.10	1.39
1=2-4	5.97	3.85	0.27	3.58	0.10	3.48
1=3-1	2.75	2.89	0.92	1.97	0.10	1.87
1=3-2	3.21	3.12	0.92	2.20	0.10	2.11
1=3-3	4.22	3.62	0.92	2.71	0.10	2.61
1=3-4	3.25	3.14	0.92	2.22	0.10	2.12
1=4-1	2.89	2.67	0.63	2.04	0.10	1.95
1=4-2	3.60	3.02	0.63	2.39	0.10	2.30
1=4-3	5.12	3.78	0.63	3.16	0.10	3.06
1=4-4	2.87	2.66	0.63	2.03	0.10	1.94

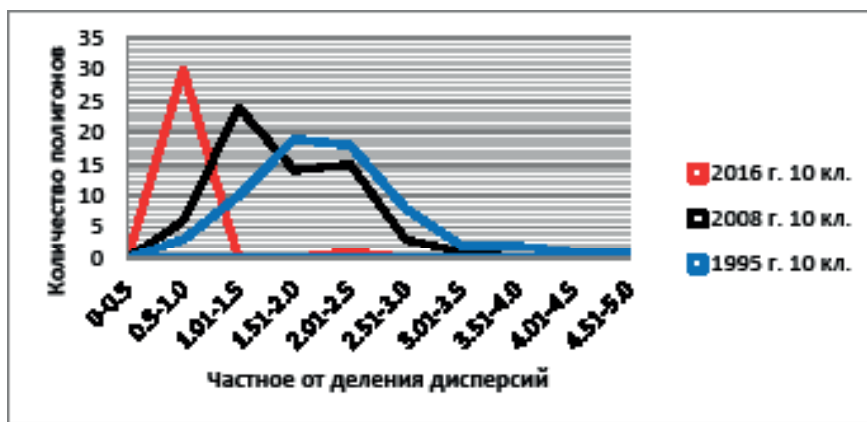


Рис. 5. Кривые распределения частного от деления дисперсий по мере восстановления лесов от пожара (при классификации на 10 классов)

Fig. 5. Distribution curves of the quotient of division of variances as forests recover from fire (when classified into 10 classes)

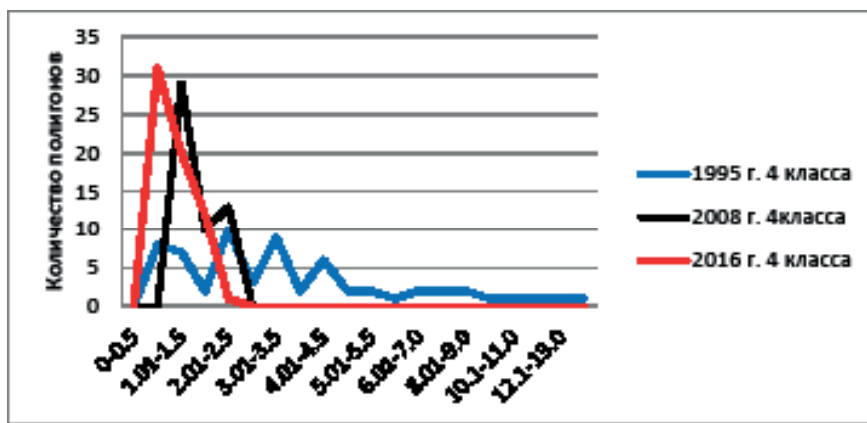


Рис. 6. Кривые распределения частного от деления дисперсий по мере восстановления лесов от пожара (при классификации на 4 класса)

Fig. 6. Distribution curves of the quotient of division of variances as forests recover from fire (when classified into 4 classes)

Изменения подобия полигонов по мере восстановления лесов от пожара. Ранее [23] определение F-теста массивов данных позволило оценить, насколько похожи исследуемые лесные массивы. Если для однородного лесного массива все значения F-теста выше 0.90, а для некоторых полигонов он выше 0.99 (полное подобие равно 1.0), то для неоднородного лесного массива значения F-теста изменялись в широком диапазоне от 0.55 до 0.94. В настоящем исследовании параллельно с определением дисперсии также проводилась оценка изменения F-теста на подобие полигонов по мере восстановления лесов. Причем сравнивались результаты классификации полигонов на 4 и 10 классов для всего выбранного временного диапазона (с 1995 по 2016 гг.).

Определялось подобие каждого полигона третьего уровня сегментации исходному полигону. Были построены кривые распределения значений F-теста для каждого года (рис. 7, 8). В результате выяснилось, что по мере восстановления лесов увеличивается доля полигонов подобных исходному полигону (табл. 10). При классификации на 4 и 10 классов в 1995 году большая часть полигонов отличается от исходного полигона и расположена в диапазоне значений F-теста на подобие от 0 до 0.3. В 2016 году доля полигонов со значениями F-теста выше

0.5 в 2 раза больше полигонов с низким подобием при классификации на 4 класса и почти в 1.5 раза больше при классификации на 10 классов. При классификации на 10 классов в 2016 г. распределение значений F-теста становится более равномерным для всего диапазона (рис. 7).

Таблица 10 – Межгодовые изменения подобия полигонов 3 уровня сегментации (64 полигона) исходному полигону по мере восстановления лесов от пожара

Год/ количество полигонов	подобие для 4 классов		подобие для 10 классов	
	до 0.5	выше 0.5	до 0.5	выше 0.5
1995 г.	52	12	55	9
2008 г.	22	42	47	17
2016 г.	20	44	26	38

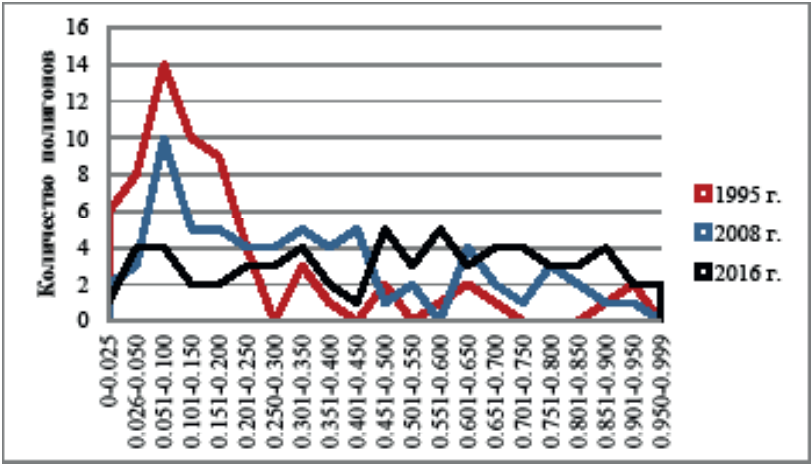


Рис. 7. Межгодовые изменения подобия полигонов 3 уровня (64 полигона) сегментации исходному полигону по мере восстановления лесов от пожара (при классификации на 10 классов)

Fig. 7. Interannual changes in the similarity of polygons of the 3rd level (64 polygons) of segmentation to the original polygon as forests recover from fire (when classified into 10 classes)

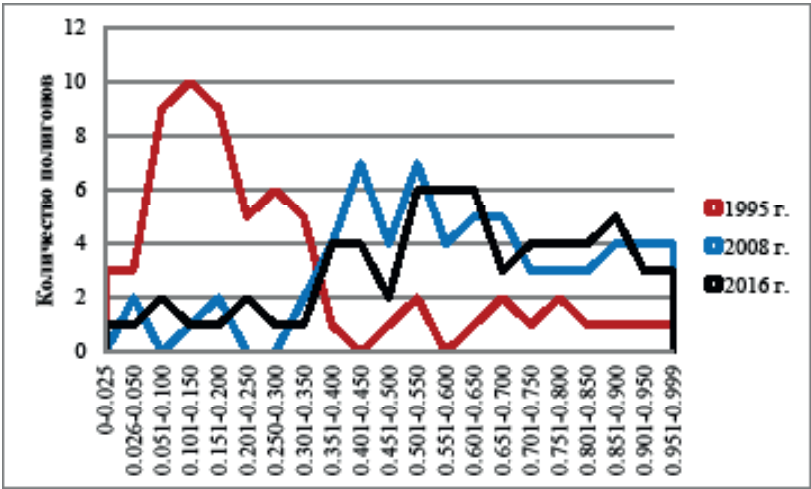


Рис. 8. Межгодовые изменения подобия полигонов 3 уровня (64 полигона) сегментации исходному полигону по мере восстановления лесов от пожара (при классификации на 4 класса)

Fig. 8. Interannual changes in the similarity of polygons of the 3rd level (64 polygons) of segmentation to the original polygon as forests recover from fire (when classified into 4 classes)

Заключение

В результате использования сегментации и кластерного анализа в дешифрировании временной серии снимков Landsat лесных экосистем Олекминского заповедника дана оценка процесса лесовосстановления после пожара 1985 года за период с 1995 по 2016 гг. Были выбраны исходные полигоны с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii Rupr.*) площадью 250 км² (масштаб 1:5000). Затем были сохранены полигоны по трем уровням сегментации- 4, 16, 64 с масштабами 1:2500, 1:1250, 1:675. При дешифрировании проводилась неуправляемая классификации полигонов методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) на 2, 4, 10 классов. Результаты классификации на 2, 4 класса использовались при расчете тематической разности пикселей и индекса, характеризующего лесистость.

Описан способ определения нарушенности экосистем и их восстановления по кривым распределения индекса лесистости. Были построены кривые распределения значений индекса лесистости для полигонов 3 уровня сегментации (64 полигона). У нарушенных экосистем закон нормального (гауссова) распределения значений не действует. Кривые распределения становятся близкими к нормальному по мере восстановления экосистемы после пожара. Шапиро- тест на нормальность распределения показал значение p -value для 2013 года = 0.16663, для 2016 года = 0.18007.

При оценке динамики лесовосстановления было показано, что наиболее нарушенные после пожара полигоны восстанавливаются с большей интенсивностью, чем слаборазрушенные. За период с 1995 по 2016 гг. у малонарушенных полигонов восстанавливается в 4.6 раза меньшая площадь, чем у сильнонарушенных. Начиная с 2008 года площадь, покрытая лесом, начинает превышать площадь послепожарных пустошей.

По результатам классификации на 4, 10 классов была проведена статобработка с расчетом показателей разности и подобия полигонов – дисперсии генеральной совокупности и теста Фишера (F-тест). Каждый полигон тетрады с масштабами 1:625, 1:1250, 1:2500 подвергался статистической обработке с определением показателей разности и подобия полигонов – дисперсии генеральной совокупности и F-теста на подобие. Определялось, насколько полигоны похожи с исходным полигоном, между собой в тетраде и с полигонами второго, третьего уровня сегментации. Сравнение изменений значений дисперсии результатов классификации полигонов по мере восстановления лесов после пожара показало, что дисперсия увеличивается во времени. В случае исходных полигонов масштаба 1:5000 при классификации на 4 и 10 классов за период с 1995 г. по 2016 г. отмечено четырехкратное увеличение. Подобное изменения дисперсии во времени может быть связано с увеличением разнообразия биотопов по мере восстановления от пожара за счет зарастания послепожарных пустошей.

Проведено сравнение изменений мультифрактальной структуры лесных экосистем по мере лесовосстановления. В качестве показателя для сравнения переходов между уровнями самоподобия (скейлинг) в разные годы может служить частное от деления дисперсии исходного полигона на разность дисперсий и дисперсии всех уровней сегментации. Кривые распределения значений частного от деления дисперсий показали, что по мере восстановления лесов диапазон распределения значений сужается. От 0 – 5.0 в 1995 году до 0 – 1.5 в 2016 году.

Расчеты межгодовых изменений F-теста на подобие между исходным полигоном и полигонами третьего уровня сегментации показали, что значения теста на подобие варьирует в диапазоне от 0 до 0.999. При классификации на 4 и 10 классов в 1995 году большая часть полигонов отличается от исходного полигона и расположена в диапазоне значений F-теста на подобие от 0 до 0.3. По мере восстановления лесов увеличивается доля полигонов с высоким подобием исходному полигону. В 2016 году доля полигонов со значением F-теста выше 0.5 в 2 раза больше полигонов с низким подобием при классификации на 4 класса и почти в 1.5 раза больше при классификации на 10 классов.

Литература

1. Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / под редакцией А. С. Исаева. – Текст: непосредственный // Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. – М.: Наука, 2008. – 453 с.
2. Исаев, А.С. Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов / А.С.Исаев, С.В. Князева, М.Ю. Пузаченко [и др.]. – Текст: непосредственный // Исследование Земли из космоса. – 2009. № 2. – С. 1-12.
3. Толкач, И.В. Методы основных таксационно-дешифровочных показателей на цифровых снимках / И.В.Толкач. – Текст: непосредственный // Труды БГТУ. – 2012. № 1. – С.63-65.
4. Малышева, Н.В. Дешифрирование древесной растительности на сверх детальных изображений: методическое пособие: учебное электронное издание / Н.В. Малышева. – Текст: электронный // ФГБОУ ВПО МГУЛ: Москва, 2014. – 40 с.
- 5.Терехин, Э. А. Сезонная динамика проективного покрытия растительности агроэкосистем на основе спектральной спутниковой информации / Э.А. Терехин. – Текст: непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. т. 16. № 4. – С. 111–123.
6. Методика лесного стереоскопического дешифрирования аэро- и космических снимков. – Леспроект: Санкт-Петербург, 2015. – 23 с.
7. Исаев, А.С. Моделирование лесообразовательного процесса: Феноменологический подход / А.С. Исаев, В.Г. Суховольский, Р.Г. Хлеборос [и др.]. – Текст: непосредственный // Лесоведение. 2005. № 1. – С 3-11.
8. Козодеров, В.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования / Козодеров В.В., Кондранин Т.В. – Текст: непосредственный // Москва: МФТИ, 2008. – 222 с.
9. Иванов, Е.С. Некоторые приложения сегментации снимков ДЗЗ / Е.С. Иванов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. Т. 13. № 1. – С. 105–116. – Текст: непосредственный.
10. Барталев, С.А. Анализ возможностей применения методов сегментации спутниковых изображений для выявления изменений в лесах / С.А. Барталев, Т.С. Ховратович. – Текст: непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – № 1. – С. 44-62.
11. Рылов, С.А. Методы и алгоритмы сегментации мультиспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения: 05.13.18: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Рылов Сергей Александрович. – Новосибирск. – 2016. – 135 с. – Текст: непосредственный.
12. Бутусов, О.Б. Мультифрактальная сегментация ландшафтов на космическом изображении / О.Б.Бутусов, Н.И.Редикульцева, О.П. Никифорова. – Текст: непосредственный // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 12 (66). Часть 2. – С. 196-203 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.216>
13. Макаренко, Н. Г. Мультифрактальная сегментация данных дистанционного зондирования / Н.Г.Макаренко, О. А. Круглун, И. Н. Макаренко [и др.]. – Текст: непосредственный // Исследование Земли из космоса. – 2008. – № 3. – С. 18–26
14. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – Москва: Техносфера, 2010. – 560 с. – Текст: непосредственный.
15. Шумаков, Ф.Т. Классификация космических снимков с использованием методов кластерного анализа / Ф.Т. Шумаков, В.А. Толстохатко, А.Ю. Малец // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. Вып. 3/4 (51). – С. 58-62.- Текст: непосредственный.
16. Fu, G., Segmentation for High-Resolution Optical Remote Sensing Imagery Using Improved Quadtree and Region Adjacency Graph Technique / G. Fu, H. Zhao, C. Li, L. Shi // Remote Sensing Journal. – 2013. – No. 5. – P. 3259–3279. doi:10.3390/rs5073259. URL: www.mdpi.com/2072-4292/5/7/3259/pdf

17. Рожков, Ю.Ф. Сравнительная характеристика лесных массивов с использованием сегментации и кластерного анализа снимков Landsat / Ю.Ф. Рожков. – Текст: непосредственный // Вестник СВФУ. Серия Науки о Земле. – 2021. № 4 (24). – С. 33-43.
18. Рожков, Ю.Ф. Оценка динамики восстановления лесов после пожаров в Олекминском заповеднике (Россия) по космическим снимкам Landsat / Ю.Ф. Рожков, М.Ю. Кондакова. – Текст: непосредственный // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – 2019. 4 (Suppl.1). – С. 1-10. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2019.014>
19. Рожков, Ю.Ф. Оценка нарушенности лесных экосистем и их восстановления после пожаров в Олекминском заповеднике (Россия) по космическим снимкам Landsat / Ю.Ф. Рожков, М.Ю. Кондакова. – Текст: непосредственный // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2021, Т. 26, № 2. – С. 94–107. – <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-6>
20. Книжников, Ю.Ф., Аэрокосмические методы географических исследований / Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцова, О.В. Тутубалина. – Текст: непосредственный // Москва: Академия, 2004. – 336 с.
21. Мандельброт, Б.Б. Фрактальная геометрия природы / Б.Б. Мандельброт. – Москва: Институт компьютерных исследований. – 2002. – 656 с. – Текст: непосредственный.
22. Mandelbrot, B.B. The fractal geometry of trees and other natural phenomena / B.B. Mandelbrot // Buffon Bicentenary Symposium on Geometrical Probability, ed. R. Miles & J. Serra. Lecture Notes in Biomathematics. – 1978. V.23.- P. 235-249.
23. Рожков, Ю.Ф. Оценка структурных характеристик лесных экосистем с использованием дешифрирования космических снимков высокого и сверхвысокого разрешений / Ю.Ф. Рожков, М.Ю. Кондакова. – Текст: непосредственный // Вестник СВФУ. – 2018. № 1 (63). – С. 38-51. DOI:10.25587/SVFU.2018.63.10539

References

1. Monitoring biologicheskogo raznoobraziya lesov Rossii: metodologiya i metody / pod redaktsiei A. S. Isaeva. – Tekst: neposredstvennyi // Tsentr po problemam ekologii i produktivnosti lesov RAN. – M.: Nauka, 2008. – 453 p.
2. Isaev A.S., Knyazeva S.V., Puzachenko M.Yu. et al. Ispol'zovanie sputnikovyykh dannykh dlya monitoringa bioraznoobraziya lesov // Issledovanie Zemli iz kosmosa. – 2009. No 2.- P. 1-12.
3. Tolkach I.V. Metody osnovnykh taksatsionno-deshifirovochnykh pokazatelei na tsifrovyykh snimkakh // Trudy BGTU. – 2012. No 1.- P.63-65.
4. Malysheva N.V. Deshifirovanie drevesnoi rastitel'nosti na sverkh detal'nykh izobrazheniyakh [Elektronnyy resurs]: metodicheskoe posobie: uchebnoe elektronnoe izdanie. – FGBOU VPO MGUL: Moscow, 2014. 40p.
5. Terekhin E. A. Sezonnaya dinamika proektivnogo pokrytiya rastitel'nosti agroekosistem na osnove spektral'noi sputnikovoi informatsii // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. V. 16. No 4.- P. 111–123
6. Metodika lesnogo stereoskopicheskogo deshifirovaniya aero- i kosmicheskikh snimkov. – Lesproekt: Sankt-Peterburg. – 2015. 23 p.
7. Isaev A.S., Sukhovolskii V.G., Khleboros R.G. et al. Modelirovanie lesnoobrazovatel'nogo protsessa: Fenomenologicheskii podkhod // Lesovedenie. – 2005. No 1.- P 3-11
8. Kozoderov V.V., Kondranin T.V. Metody otsenki sostoyaniya pochvenno-rastitel'nogo pokrova po dannym opticheskikh sistem distantsionnogo aerokosmicheskogo zondirovaniya. – M: MFTI. 2008.- 222 p.
9. Ivanov E.S. Nekotorye prilozheniya segmentatsii snimkov DZZ // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2016. V. 13. No 1.- P. 105–116
10. Bartalev S.A. Analiz vozmozhnostey primeneniya metodov segmentatsii sputnikovyykh izobrazheniy dlya vyavleniya izmeneniy v lesah / S.A. Bartalev, T.S. Hovratovich // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2011. – v. 8. – No 1. – P. 44-62
11. Rylov S.A. Metody i algoritmy segmentatsii mul'tispektral'nykh sputnikovyykh izobrazheniy vysokogo prostranstvennogo razresheniya/ Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk. – Novosibirsk. – 2016. – 135 p.

12. Butusov O.B., Redikul'tseva N.I., Nikiforova O.P. Mul'tifraktal'naya segmentatsiya landshaftov na kosmicheskom izobrazhenii // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. – 2017. No 12 (66). Chast' 2. P. 196-203 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.216>
13. Makarenko N. G. , Kruglun O. A. Makarenko I. N et al. Mul'tifraktal'naya segmentatsiya dannykh distantsionnogo zondirovaniya // Issledovanie Zemli iz kosmosa .-2008. No 3.- p. 18–26
14. Shovengerdt R.A. Distantsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazhenii. – Moscow: Tekhnosfera, 2010.- 560 p.
15. Shumakov F.T., Tolstokhat'ko V.A., Malets A. Yu. Klassifikatsiya kosmicheskikh snimkov s ispol'zovaniem metodov klasterного анализа // Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii. – 2011. V. 3/4 (51). -P. 58-62.
16. Fu G., Zhao H., Li C., Shi L. Segmentation for High-Resolution Optical Remote Sensing Imagery Using Improved Quadtree and Region Adjacency Graph Technique // Remote Sens. 2013. No. 5. -P. 3259–3279. doi:10.3390/rs5073259. URL: www.mdpi.com/2072-4292/5/7/3259/pdf
17. Rozhkov Yu.F. Sravnitel'naya harakteristika lesnykh massivov s ispol'zovaniem segmentatsii i klasterного анализа snimkov Landsat // Vestnik SVFU. Seriya Nauki o Zemle. -2021. No 4 (24). – P. 33-43
18. Rozhkov Yu.F., Kondakova M. Yu. Ocenka dinamiki vosstanovleniya lesov posle pozharov v Olekminskom zapovednike (Rossiya) po kosmicheskim snimkam Landsat // Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka. – 2019. 4(Suppl.1). – P.1-10.- <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2019.014>
19. Rozhkov Yu.F., Kondakova M. Yu. Otsenka narushennosti lesnykh ekosistem i ikh vosstanovleniya posle pozharov v Olekminskom zapovednike (Rossiya) po kosmicheskim snimkam Landsat // Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики. 2021, V. 26, No 2. P. 94–107. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-6>
20. Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V. Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovaniy. – M.: Akademiya, 2004.- 336 p.
21. Mandel'brot B.B. Fraktal'naya geometriya prirody. – M: Institut komp'yuternykh issledovaniy. – 2002.- 656 p.
22. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of trees and other natural phenomena/ Buffon Bicentenary Symposium on Geometrical Probability, ed. R. Miles&J. Serra. Lecture Notes in Biomathematics 1978. V.23.- p. 235-249.
23. Rozhkov Yu.F., Kondakova M. Yu. Otsenka strukturnykh kharakteristik lesnykh ekosistem s ispol'zovaniem deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov vysokogo i sverkhvysokogo razresheniya // Vestnik SVFU. – 2018. No 1 (63). – P. 38-51. DOI:10.25587/ SVFU.2018.63.10539

Сведения об авторах

РОЖКОВ Юрий Филиппович – к.х.н., заместитель директора по научной работе ФГБУ «Государственный природный заповедник «Олекминский», e-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru

ROZHKOVA Yurii Filippovich – Candidate of Chemical Sciences, Deputy Director for Scientific Research, Olyokminsky State Nature Reserve, e-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru

КОНДАКОВА Мария Юрьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУ «Гидрохимический институт», e-mail: vesna-dm@mail.ru

KONDAKOVA Maria Yuryevna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Hydrochemical Institute, e-mail: vesna-dm@mail.ru

*Н. И. Тананаяев*Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
e-mail: tanni@s-vfu.ru

ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ КЛИМАТИЧЕСКОГО РЕАНАЛИЗА ПО СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ВОЗДУХА ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Аннотация. Данные о среднегодовых температурах воздуха (СГТВ) для исторического (1961-1990 гг.) и актуального (1991-2020 гг.) климатических периодов по 91 метеостанции на территории Республики Саха (Якутия) использованы для оценки точности воспроизведения наблюдаемой СГТВ и ее изменений современными моделями климатического реанализа. Анализ ошибок показывает, что модель GHCN-CAMS точнее прочих, с модулем средней ошибки менее 0.15°C, и наибольшим коэффициентом конкордации, воспроизводит современный климат и может использоваться как модель «базового климата» в различных расчетных и прогнозных приложениях. Ограничение этого продукта – временное разрешение (месяц). Одновременно, только для оценки изменения температурных характеристик между периодами допустимо использовать также данные реанализа ERA5-Land, имеющие более высокое пространственное и временное разрешение. Коэффициенты регрессии между наблюдаемыми СГТВ и данными реанализа ERA5-Land неустойчивы во времени, что увеличивает неопределенность регрессионного метода приведения одних данных к другим. Все рассмотренные модели реанализа занижают скорость роста СГТВ на некоторых метеостанциях центральной Якутии, что предполагает наличие устойчивых островов тепла в крупных населенных пунктах этой территории.

Ключевые слова: Республика Саха (Якутия), среднегодовая температура воздуха, региональный климат, климатический реанализ, климатические покрытия, коэффициент конкордации, пространственная скоррелированность, материалы метеонаблюдений, наблюдаемые климатические изменения, городские острова тепла

*N. I. Tananaev*M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia
Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
e-mail: tanni@s-vfu.ru

SELECTION OF THE BEST-PERFORMING CLIMATE REANALYSIS MODEL FOR THE SAKHA (YAKUTIA) REPUBLIC, BASED ON MEAN ANNUAL AIR TEMPERATURE

Abstract. Mean annual air temperature (MAAT) values for the historic (1961 – 1990) and modern (1991 – 2020) reference climatic periods, collected from 91 meteorological stations across the Sakha (Yakutia) Republic were used in an evaluation of the performance of several modern reanalysis products. The model error analysis shows GHCN-CAMS to be the best-performing MAAT reanalysis product, with the lowest absolute error, below 0.15°C, and best concordance with observation data. This product can be used as a ‘baseline climate’ in geospatial modeling and future climate forecasts. Its main limitation is monthly temporal resolution. The ERA5-Land product, having higher spatial and temporal resolution, can be used to track changes in climate-related variables between periods, but its absolute MAAT values deviate systematically and non-concordantly from the observed data. Parameters of the linear regression relating ERA5-Land data to observations are shown to be time-dependent, hence such evaluation yields increased uncertainty limiting the applicability of this approach. All reanalysis products underestimate the observed MAAT increase at stations across central Yakutia, which suggests the appearance of stable ‘urban heat islands’ in the recent decades.

Keywords: Sakha (Yakutia) Republic, mean annual air temperature, regional climate, climate reanalysis, climatic spatial coverage, coefficient of concordance, spatial correlation, meteorological observations data, observed climate warming, urban heat islands

Введение

Региональный климатический анализ опирается на данные наблюдений на регулярной сети Росгидромета: выполненных по единой методике, однородных и сопоставимых между станциями. При достаточной плотности наблюдательной сети в регионе, равномерном распределении метеостанций по высотным зонам и типичным ландшафтам, картирование климатических характеристик может успешно опираться на методы автоматизированной интерполяции, дополненные географическими подходами: учётом атмосферной циркуляции, взаимосвязей климата с рельефом и другими природными факторами [1]. Нередко, особенно при решении задач регионального картирования, перечисленные условия не выполняются. Средняя плотность метеостанций в Республике Саха (Якутия) примерно втрое меньше, чем в среднем по территории РФ, особенно в труднодоступных и малонаселенных арктических и горных районах, что затрудняет решение интерполяционных задач.

В последние два десятилетия задача ассимиляции данных срочных и осредненных наблюдений в узлы регулярной сетки решается моделями климатического реанализа, сочетающими автоматизированную пространственную интерполяцию с методами краткосрочного прогноза погоды и климатического моделирования [2]. Выход таких моделей – пространственные покрытия, описывающие поля метеозлементов в заданный срок, либо осредненные до нужного временного разрешения (сутки, месяцы, годы). Использование данных реанализа позволяет решать задачи, нерешаемые только по точечным данным метеостанций.

Во-первых, геопривязанные покрытия, представляющие выход моделей реанализа – база для климатического картирования, построения электронных карт-дериватов, например, суровости климата и подобных [3], анализа составляющих водного баланса крупных речных водосборов [4], других геопространственных расчетов. Во-вторых, данные реанализа целесообразно использовать в качестве «базового климата» для приведения к ним модельных климатических проекций, представляющих собой пространственные покрытия сопоставимого разрешения [5]. Известно, что ранние результаты прогнозного гидродинамического моделирования климата в моделях предыдущих поколений для территории РФ обладали малой достоверностью [6], эта черта присуща также индивидуальным моделям более поздних поколений [7,8]. По этой причине для региональной оценки климатических изменений следует использовать изменение модельного климата будущего относительно модельного климата некоторого исторического периода, «приложенное» к базовым значениям климатических переменных за тот же исторический период, как это сделано, например, в работе [5]. В качестве таких базовых значений могут быть использованы данные реанализа.

Данные реанализа, как было показано ранее в работах [2,9], имеют большую неопределенность и неравномерно распределенные по территории РФ погрешности. За время, прошедшее после выхода работы [2], расширился ряд доступных климатических архивов, повысилась их точность, появились новые задачи. Региональное планирование адаптационных мероприятий, проводимое в рамках национального плана адаптации к климатическим изменениям, должно быть обеспечено информацией. Для территории РС (Я) оценка точности некоторых моделей реанализа выполнялась ранее [10], однако сравнение в этой работе сделано только для двух моделей (ERA-Interim и NCEP/NCAR), и только по пяти метеостанциям, чего недостаточно для решения перечисленных задач. Подбор оптимальной модели реанализа для Республики Саха (Якутия) остается актуальной научно-практической задачей, до настоящего времени нерешенной.

В данной работе приведена оценка точности воспроизведения несколькими современными моделями реанализа наблюдаемых точечных данных о среднегодовой температуре воздуха (СГТВ) в исторический (1961-1990 гг.) и актуальный (1991-2020 гг.) климатические периоды, изменения СГТВ между этими периодами. Цель работы – определить оптимальную модель для решения перечисленных выше практических задач с использованием метрик корреляции и конкордации, сведений об ошибках моделей и их пространственном распределении.

Материалы и методы

Климатические нормы СГТВ на метеостанциях РС(Я) за исторический (1961-1990 гг.) и актуальный (1991-2020 гг.) периоды получены с официального сайта Гидрометцентра РФ [11]. Использованы также точечные .shp файлы с геопривязкой, содержащие координаты метеостанций.

В работе использованы следующие основные модели реанализа:

1. NCEP/NCAR Reanalysis 1, NOAA, США; реанализ полей среднесуточной температуры воздуха, пересчитанных из четырехсрочных наблюдений (3, 9, 15 и 21 ч. UTC) на сетке разрешением $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ [12];

2. ERA5-Land, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), Великобритания; реанализ полей среднесуточной температуры воздуха на сетке разрешением $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ [13];

3. CRU TS v.4.05 (Climate Research Unit), Университет Восточной Англии, Великобритания; реанализ полей среднесуточной температуры воздуха на сетке разрешением $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ [14];

4. GHCN-CAMS (Global Historical Climatology Network + Climate Anomaly Monitoring System), NOAA, Центр климатических прогнозов: реанализ полей среднемесячной температуры воздуха на сетке разрешением $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ [15].

Данные других моделей реанализа, в числе которых: NCEP/DOE Reanalysis 2, NCEP/CIRES/DOE 20CRv3, JRA-55, архив Университета штата Делавэр, в этой работе не использовались, поскольку они не закрывают всего периода с 1960 по 2020 гг. и не могут быть сопоставлены с данными метеостанций в оба климатических периода.

Статистический анализ выполняли в RStudio [16], графическом интерфейсе пользователя для языка R [17]. Данные реанализов, хранящиеся в файлах формата NetCDF, были преобразованы в геопривязанные растровые покрытия с использованием авторских скриптов на основе функций пакета ‘tidync’ [18]. Для каждого реанализа были построены поля СГТВ для периода с 1961 по 1990 г., периода с 1991 по 2020 г., а также для изменения СГТВ между двумя периодами (рассчитано в QGIS 3.11 [19], свободно распространяемом программном обеспечении, с помощью функции Raster Calculator).

Значения СГТВ для двух периодов и её изменения между периодами в точках расположения метеостанций для каждого покрытия определены в QGIS 3.11, используя плагин Point Sampling Tool версии 0.5.3. Оценка точности реанализа, его близости к данным наблюдений, выполнялась по трем параметрам: RMSE, root mean square error, корень среднеквадратичной ошибки; r_{corr} , коэффициент линейной корреляции (Пирсона); CCC, коэффициент конкордации Лина, показывающий близость линейной регрессии к линии 1:1. Расчеты выполнены в RStudio, с использованием функций *rmse()* пакета ‘Metrics’, *cor()* и *ks.test()* пакета ‘stats’, *CCC()* пакета ‘DescTools’.

Результаты и обсуждение

Описательная статистика. В работе использованы данные по 91 метеостанции на территории РС(Я), для которых Росгидрометом опубликованы исторические и актуальные климатические нормы [11]. Существующая сеть метеостанций по преимуществу расположена в высотных зонах до 400 м и характеризует климат равнинных районов региона; только две станции расположены на высоте свыше 1000 м, тогда как наибольшая высота в РС(Я) превышает 3000 м над уровнем моря.

Следовательно, оценивается точность воспроизведения моделями реанализа в основном климата равнинной части республики.

Осредненная по всем метеостанциям СГТВ составляла $-11.1 \pm 2.9^{\circ}\text{C}$ в 1961-1990 гг., $-9.7 \pm 2.8^{\circ}\text{C}$ в 1991-2020 гг., средний прирост СГТВ между этими периодами составил $+1.4 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$. Аналогичные данные по моделям реанализа приведены в Табл. 1, из которой видно, что среди них выделяются модели с более высокой СГТВ (относительно наблюдений): NCEP/NCAR и ERA5-Land, с более низкой СГТВ: CRU TS, на фоне близкой к данным наблюдений модели GHCN-CAMS. Сравнение эмпирических функций распределения наблюдаемых и модельных данных сделано с помощью критерия согласия Колмогорова-Смирнова (Табл. 1). Оно показывает, что только данные модели GHCN-CAMS относятся к той же генеральной совокупности, что и наблюдаемые на метеостанциях ($p > 0.05$).

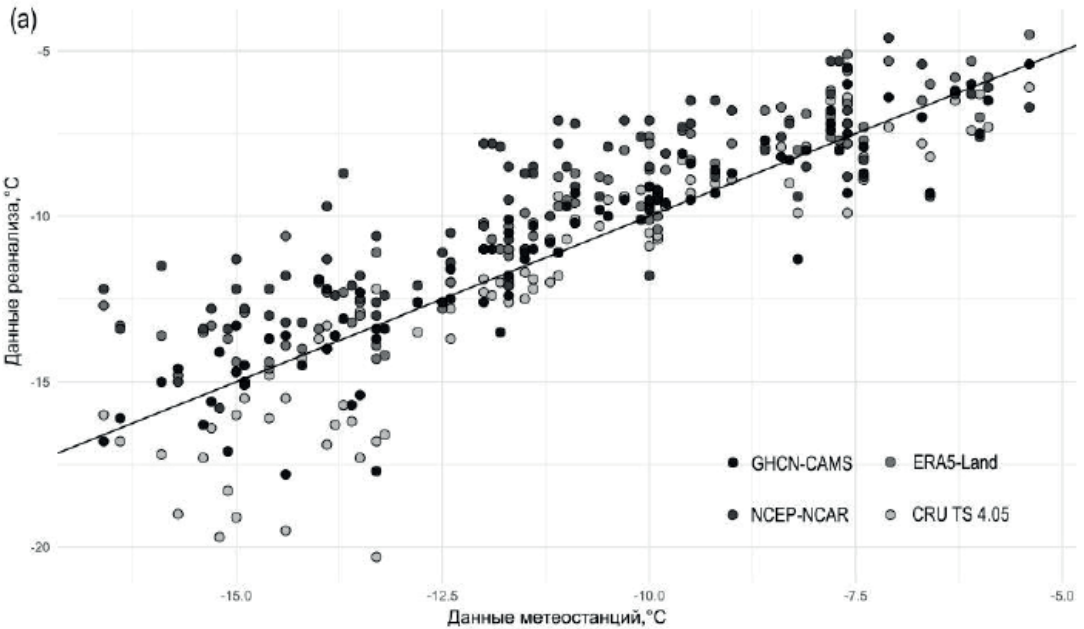
Таблица 1 – Среднегодовая температура воздуха в точках расположения метеостанций, по данным моделей реанализа

Реанализ	1961-1990 гг.		1991-2020 гг.		Изменение между периодами	
	СГТВ	p , тест К-С*	СГТВ	p , тест К-С	СГТВ	p , тест К-С
NCEP/NCAR	-9.6 ± 2.6	< 0.01	-8.4 ± 2.5	0.02	$+1.2 \pm 0.45$	< 0.01
ERA5-Land	-10.1 ± 2.8	0.10	-8.8 ± 2.8	0.25	$+1.3 \pm 0.27$	< 0.01
CRU TS 4.05	-11.8 ± 3.7	0.05	-10.5 ± 3.7	0.07	$+1.3 \pm 0.11$	< 0.01
GHCN-CAMS	-11.0 ± 3.1	0.72	-9.7 ± 3.1	0.98	$+1.3 \pm 0.33$	0.12

* тест К-С – p -значение, двухвыборочный тест Колмогорова-Смирнова

* test K-S – p -value, two-sample Kolmogorov-Smirnov test

Сопоставление данных наблюдений и реанализа за периоды 1961-1990 гг. (рис. 1 а) и 1991-2020 гг. (рис. 1б) показывает, что все модели реанализа имеют тенденцию завышать СГТВ в диапазоне от -8°C до -12.5°C . В более теплых районах точки разбросаны относительно линии 1:1 равномерно; в холодных районах с СГТВ ниже $-12...-13^{\circ}\text{C}$ реанализ CRU TS 4.05 значительно занижает температуру, что отражено в табл. 1.



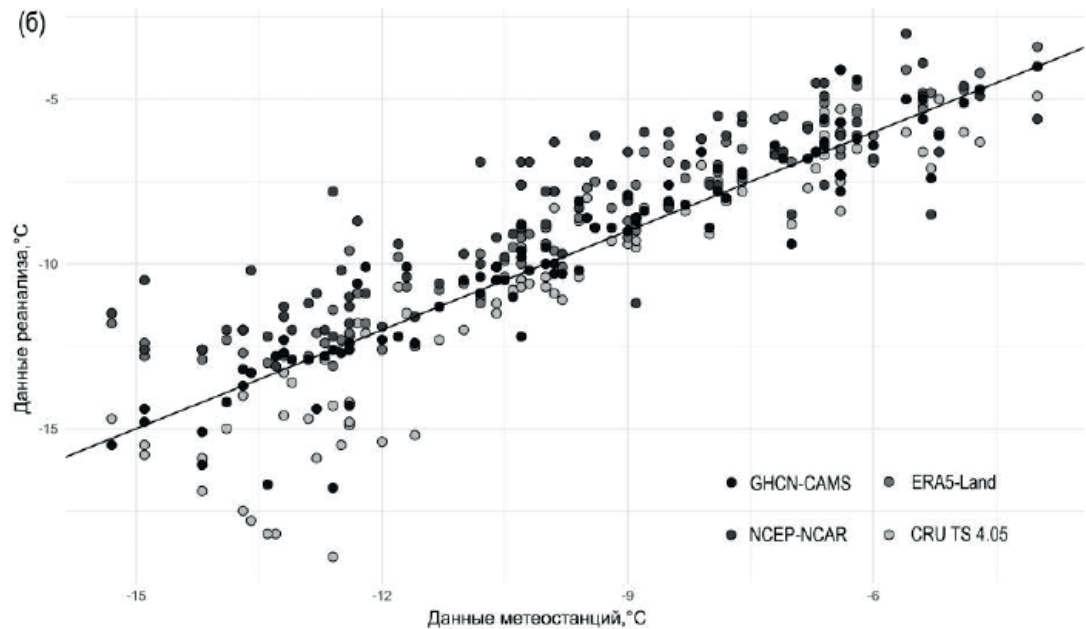


Рис. 1. Среднегодовая температура воздуха на метеостанциях РС(Я) и в точках их расположения по данным реанализа: (а) за период 1961-1990 гг., (б) за период 1991-2020 гг, прямая – линия 1:1.

Fig. 1 Mean annual air temperature at meteo stations in Sakha (Yakutia) Republic and in reanalysis data at corresponding points: (a) in 1961 – 1990; (b) in 1991 – 2020; black line corresponds to unity (1:1) line

Оценка тесноты линейной связи. Метрики тесноты связи между данными наблюдений и реанализа (Табл. 2) отдают преимущество двум моделям: ERA5-Land и GHCN-CAMS, но не позволяют сделать однозначный выбор между ними. Два реанализа близки между собой, но показывают себя наилучшим образом в разных метриках. Реанализ ERA5-Land систематически завышает СГТВ, примерно на +1°C (табл. 1), потому при высоких значениях r имеет меньшие значения CCC; с другой стороны, изменение СГТВ во времени эта модель оценивает точнее по всем использованным метрикам. Реанализ GHCN-CAMS точнее ERA5-Land по коэффициенту конкордации, близок по другим метрикам, но хуже оценивает изменение СГТВ между периодами (табл. 2).

Таблица 2 – Метрики тесноты связи между данными метеостанций и реанализа

Параметр	СГТВ, период 1961-1990 гг.			СГТВ, период 1991-2020 гг.			Изменение СГТВ между периодами		
	r	RMSE	CCC	r	RMSE	CCC	r	RMSE	CCC
NCEP-NCAR	0.84	1.56	0.717	0.86	1.43	0.764	0.39	0.50	0.30
ERA5-Land	0.94	0.968	0.888	0.96	0.82	0.915	0.53	0.30	0.46
CRU TS 4.05	0.92	1.104	0.875	0.93	1.044	0.877	0.33	0.29	0.22
GHCN-CAMS	0.93	1.079	0.925	0.945	0.92	0.94	0.28	0.39	0.27

* r – коэффициент корреляции Пирсона, RMSE – корень среднеквадратичной ошибки, CCC – коэффициент конкордации Лина

* r – Pearson correlation coefficient, RMSE – root mean square error, CCC – Lin’s concordance correlation coefficient

Анализ ошибок моделей реанализа. Оценка абсолютных ошибок моделей реанализа, приведенная в табл. 3, показывает, что низкое пространственное разрешение данных, приводит к наибольшим ошибкам (модель NCEP/NCAR). Наименьшие ошибки у реанализа GHCN-CAMS, близкого к данным наблюдений по средним значениям (см. табл. 1). Распределение ошибок почти всех моделей гетероскедастично (рис. 2), что завышает значения рассчитанных коэффициентов корреляции и других мер качества линейных моделей. Менее всего гетероскедастичность выражена в поле ошибок модели GHCN-CAMS, как следствие, для нее данные, приведенные в табл. 2, наиболее достоверны.

Таблица 3 – Ошибки моделей реанализа относительно данных наблюдений

Реанализ	1961-1990 гг.	1991-2020 гг.	Изменение
NCEP/NCAR	<u>1.56</u> -2.8 / 5.0	<u>1.31</u> -3.2 / 4.8	<u>-0.25</u> -1.2 / 1.2
ERA5-Land	<u>0.98</u> -1.0 / 3.9	<u>0.83</u> -0.9 / 3.5	<u>-0.15</u> -1.0 / 0.5
CRU TS 4.05	<u>-0.69</u> -7.0 / 1.7	<u>-0.73</u> -6.3 / 1.6	<u>-0.04</u> -0.7 / 0.7
GHCN-CAMS	<u>0.12</u> -4.4 / 2.1	<u>0.02</u> -4.2 / 2.3	<u>-0.10</u> -1.1 / 0.6

Примечание: в числителе – средняя ошибка модели, в знаменателе приведены минимальная и максимальная ошибки.

Note: numerator, mean model error; denominator, model error range (minimum and maximum errors, separated by a slash)

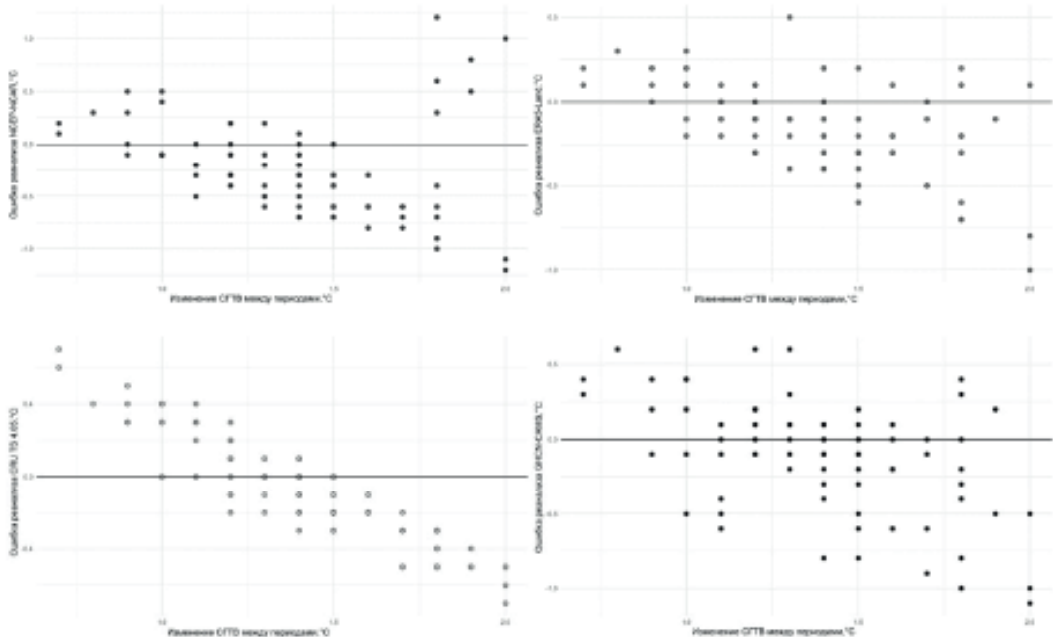


Рис. 2. Ошибки определения изменения СГТВ между климатическими периодами 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг. различными моделями реанализа, сопоставленные с данными наблюдений

Fig. 2 Estimation errors for reanalyses-derived difference in MAAT between reference periods (1961-1990 and 1991-2020) compared to observed difference

Пространственное распределение ошибок моделей (рис. 3, 4) подтверждает сделанные выше выводы: модели завышают значения СГТВ повсеместно (NCEP/NCAR) или преимущественно в центральной Якутии (ERA5-Land), занижают их на горном Северо-Востоке (CRU TS 4.05). Климат 1991-2020 гг. модели реанализа воспроизводят точнее климата 1961-1990 гг. или с сопоставимой точностью (см. также табл. 3).

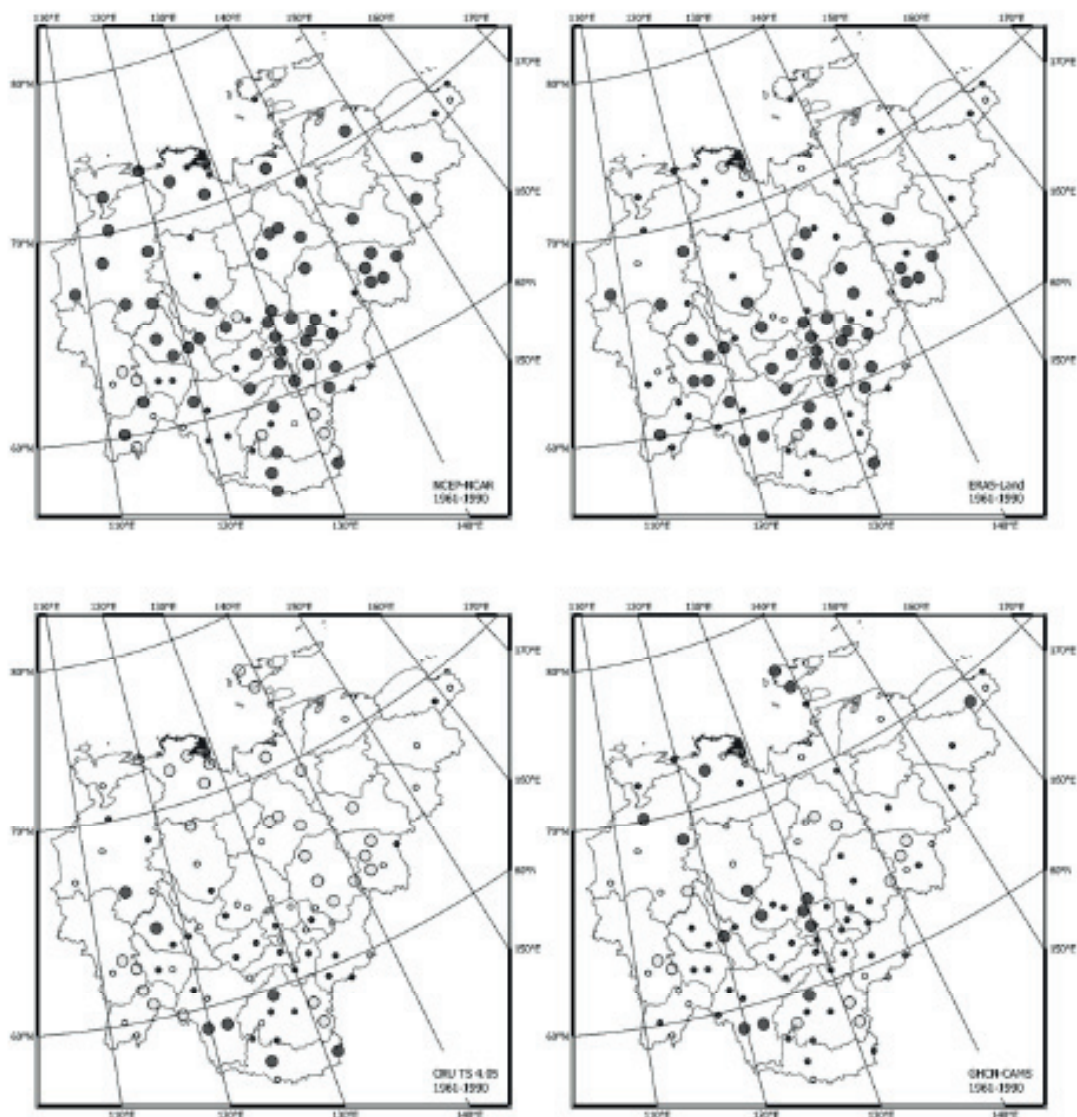


Рис. 3. Пространственное распределение ошибок моделей реанализа относительно данных метеостанций, период 1961-1990 гг. Тон пунсона: светлый – занижение, темный – завышение СГТВ; размер пунсона: малый – ошибка менее 1°C, крупный – более 1°C

Fig. 3 Spatial distribution of reanalyses errors in MAAT relative to observed data, 1961-1990. Point shades correspond to overestimation (dark) or underestimation (light), point size corresponds to within 1°C (small), over 1°C (large)

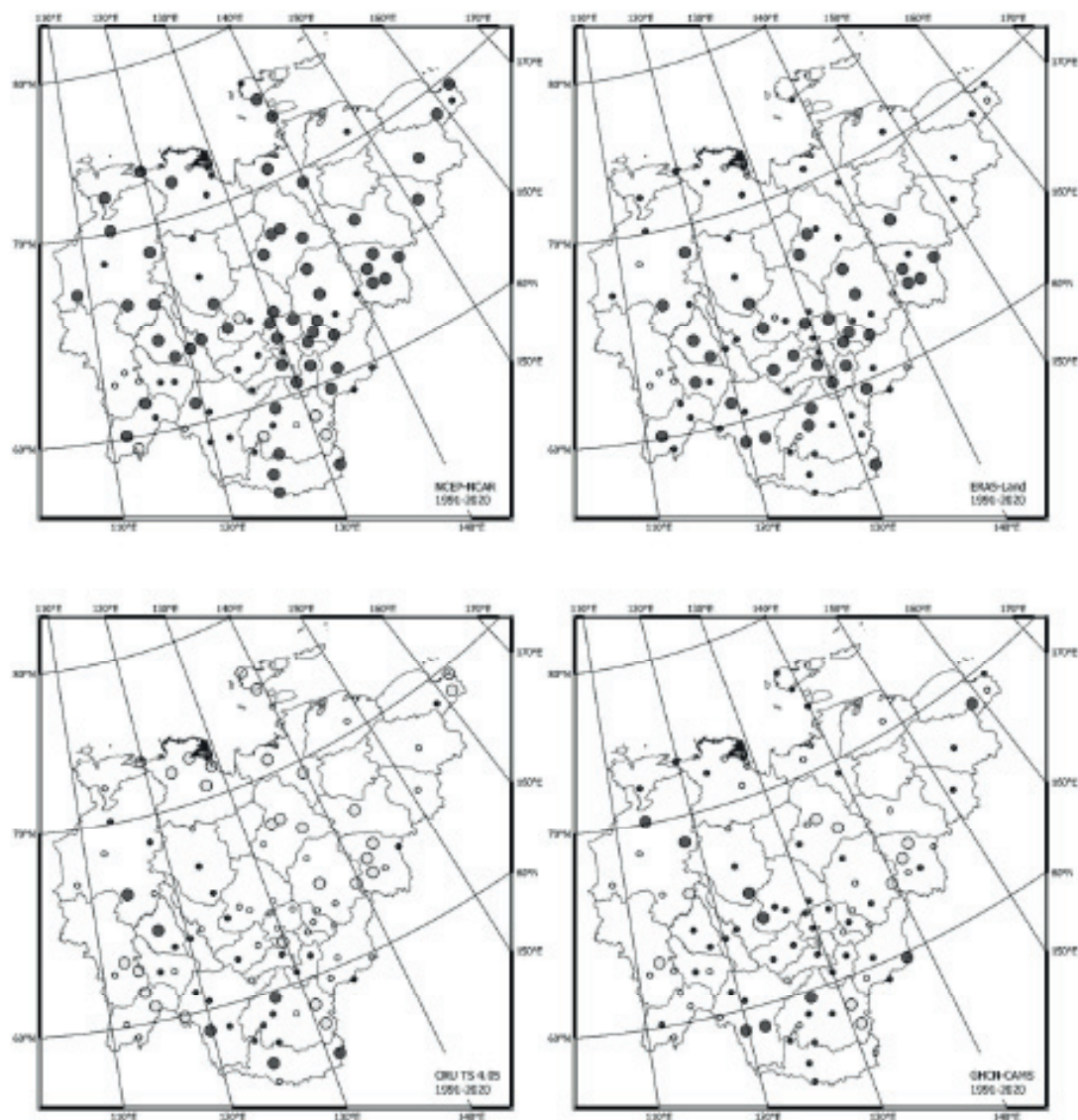


Рис. 4. Пространственное распределение ошибок моделей реанализа относительно данных метеостанций, период 1991-2020 гг. Тон пунсона: светлый – занижение, темный – завышение СГТВ; размер пунсона: малый – ошибка менее 1°C, крупный – более 1°C

Fig. 4 Spatial distribution of reanalyses errors in MAAT relative to observed data, 1991-2020. Point shades correspond to overestimation (dark) or underestimation (light), point size corresponds to within 1°C (small), over 1°C (large)

Пространственное распределение ошибок реанализа относительно изменения СГТВ между периодами также различается между моделями с положительной и отрицательной средней ошибкой (рис. 5, табл. 3). Модели NCEP/NCAR и ERA5-Land занижают изменения по всей территории РС (Я), CRU TS их завышает, GHCN-CAMS – завышает в южной и юго-западной Якутии, и занижает в центральной Якутии.

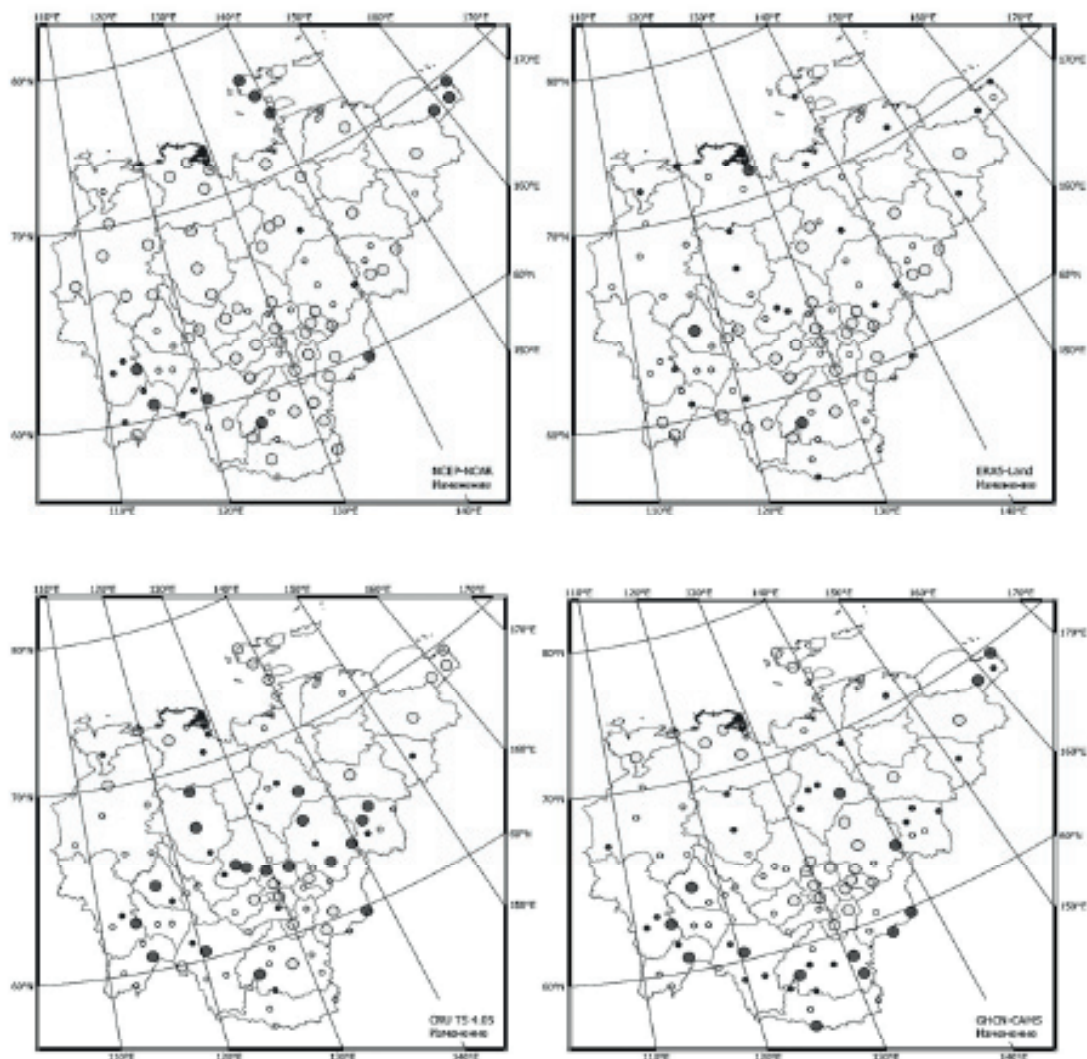


Рис. 5. Пространственное распределение ошибок моделей реанализа относительно данных метеостанций, изменение между периодами 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг. Тон пунсона: светлый – занижение, темный – завышение СГТВ; размер пунсона: малый – ошибка менее 0.25°C , крупный – более 0.25°C

Fig. 5 Spatial distribution of reanalyses errors in MAAT inter-period difference relative to observed data. Point shades correspond to overestimation (dark) or underestimation (light), point size corresponds to within 1°C (small), over 1°C (large)

«Городские острова тепла». Все использованные модели реанализа показывают значительно, на $0.25\text{--}0.5^{\circ}\text{C}$ и более, заниженные оценки изменения СГТВ между периодами на метеостанциях центральной Якутии – Бердигестях, Намцы, Ытык-Кюель, Крест-Хальджай, и отдельно следует выделить м/с Якутск, где ошибки моделей наибольшие, от -0.8 до -1.1°C . Данные этих метеостанций ассимилируются в реанализе, поэтому такое занижение указывает, что их влияние отгнано другими географическими факторами. Локальный климат в точках их расположения может отличаться от окружающей «фоновой» территории вследствие естественных причин, например, положения в рельефе, либо антропогенного влияния, например, тепляющего эффекта «городских островов тепла».

Метеостанции Намцы, Крест-Хальджай и Якутск расположены в долинах крупных рек, для которых типично формирование выраженных температурных инверсий зимнего периода [20]. Переоценка этого эффекта моделями реанализа потенциально может занижать оценку изменений, но должна была приводить также к занижению абсолютных значений СГТВ, чего в реальности не наблюдается (Рис. 3, 4).

«Городские острова тепла» обнаруживаются во многих арктических поселениях с численностью населения свыше 3000 жителей [21]. Для 75 % поселений их средний температурный эффект оценивается в пределах от $+0.5^{\circ}\text{C}$ до $+2.5^{\circ}\text{C}$, а сезонные различия, в отличие от поселений умеренных широт, оказываются незначительными [22]. В летний сезон – интенсивный нагрев освоенных территорий, лишенных растительности, а в зимний сезон – прямая теплоотдача зданий, приводят к выраженному эффекту «острова тепла», слабо зависящего от численности населения [21, 22]. Предположительно, модели реанализа, использующие, помимо ассимиляции наблюдений, также методы краткосрочного прогноза и климатического моделирования, не в состоянии воспроизвести этот локальный эффект. В Якутске его величина регулярно достигает $+5^{\circ}\text{C}$ [23], в крупных сельских поселениях РС(Я) он совершенно неизучен.

Особенности использования моделей GHCN-CAMS и ERA5-Land. Данные о СГТВ реанализа GHCN-CAMS для территории РС(Я) оптимальны для использования в качестве «базового климата», относительно которого оценивается качество гидродинамических моделей в историческом эксперименте, и к которому применяются прогнозные (сценарные) изменения для оценки будущего климата. В данной работе не затрагиваются вопросы, связанные с оптимальностью этой модели в отношении среднесезонной и среднемесячной температуры воздуха. Предполагается, что модель, успешно описывающая СГТВ, компетентна и в описании температуры более дробных периодов. Выбор оптимальной модели для описания климата отдельных улусов (районов) РС(Я) может опираться на сведения о пространственном распределении ошибок моделей реанализа, приведенном на рис. 3-5.

Временное разрешение модели (месяц) ограничивает её использование в задачах сценарного прогнозирования климатических характеристик, основанных на среднесуточных данных – например, сумма биологических температур, средняя температура наиболее жаркой 30-тидневки, и подобных. Для оценки изменений таких характеристик между отдельными периодами, например, 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг., целесообразно использовать данные реанализа ERA5-Land, хотя вопрос, насколько эти данные точны на территории РС(Я) именно в суточном разрешении, требует дополнительных исследований. В качестве модели «базового климата» для сценарных прогнозов, а также для региональных геопространственных расчетов, для которых нужно точное значение СГТВ, эту модель предпочтительнее не использовать.

В более ранних региональных исследованиях, также отмечавших систематическую погрешность в данных реанализа ERA [10], предлагалось использовать регрессионный анализ для устранения такой погрешности и пересчета реанализа к наблюдаемым данным в точке расположения метеостанции (на примере м/с Тикси). Данная задача технически решается просто, но применимость такого подхода ограничена только пикселями, в которых расположены метеостанции (91 пиксель из 25760). Теоретически, коэффициенты регрессии могут быть интерполированы между соседними метеостанциями для получения непрерывного покрытия, однако необходимо также быть уверенным, что они устойчивы во времени.

Устойчивость коэффициентов линейной регрессии во времени оценим по всем имеющимся данным метеостанций, построив единую для территории РС(Я) модель приведения данных ERA5-Land к наблюдаемым. Для периода 1961-1990 гг. нами получено регрессионное уравнение между СГТВ на метеостанции T , $^{\circ}\text{C}$, и СГТВ в соответствующем пикселе T_{ERA5} , $^{\circ}\text{C}$:

$$T = 0.94 \cdot T_{ERA5} - 1.59, r = 0.93;$$

для периода 1991–2020 гг.:

$$T = 0.97 \cdot T_{ERA5} - 1.10, r = 0.96.$$

Таким образом, коэффициенты линейной регрессии, приводящей значения СГТВ в пикселе по данным ERA5-Land к фактически наблюдаемым, неустойчивы во времени. По нашим оценкам, неучёт этой изменчивости вносит дополнительную неопределенность на уровне $\pm 0.2^\circ\text{C}$, в расчет СГТВ по данным ERA5-Land.

Заключение

Совместный анализ данных метеостанций и моделей реанализа, а также ошибок этих моделей и их пространственного распределения, приводит к выводу об оптимальности модели GHCN – CAMS для описания исторических и современных полей СГТВ на территории РС (Я). Такой вывод позволяют сделать (в совокупности): максимальные p -значения теста Колмогорова – Смирнова; близость средних СГТВ между данными метеостанций и реанализа; высокие значения метрик сходства, среди которых наиболее значимым считаем коэффициент конкордации Лина; слабо смещённые и относительно гомоскедастичные ошибки. Подразумеваем также, что этот реанализ оптимален также для решения задач, связанных со среднемесячной и среднесезонной температурой воздуха, и в масштабе отдельных улусов (районов) РС (Я).

Пространственное распределение ошибок моделей реанализа, в том числе GHCN-CAMS, указывает, что они занижают интенсивность роста СГТВ на территории центральной Якутии, по сравнению с наблюдаемым на метеостанциях. Наиболее вероятно, что такое занижение связано с эффектом «городских островов тепла», влияние которых в реанализе нивелируется использованием, параллельно с ассимиляцией наблюдений, методов и данных краткосрочного прогноза, и моделирования.

Недостаток модели GHCN – CAMS – месячное временное разрешение, что делает невозможным её использования в расчетах, для которых требуются среднесуточные данные о температуре воздуха. В таких случаях оценку изменений климатических параметров допустимо выполнять с использованием данных реанализа ERA5 – Land, учитывая их смещённый характер. Смещение допустимо устранять с использованием методов линейной регрессии, коэффициенты которой зависят от выбранного временного интервала.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-27-00344.

Литература

1. Божиллина, Е. А. Принципы географической картографии в современной климатологии / Е. А. Божиллина, В. Н. Сорокина. – Текст: непосредственный // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2012. – № 1. – С. 61–66.
2. Жильцова, Е. Л. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами / Е. Л. Жильцова, О. А. Анисимов. – Текст: непосредственный // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 10. – С. 79–89.
3. Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики: руководство / под редакцией Н. В. Кобышевой; Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. – Санкт-Петербург: Росгидромет, 2008. – 336 с. – Текст: непосредственный.
4. Булавина, А. С. Пространственно-временной анализ климатических факторов формирования стока Оби / А. С. Булавина. – Текст: непосредственный // Труды Кольского научного центра РАН. – 2022. – Выпуск 10. Океанология. – С. 15–26.

5. Kirillina, K.S. Climate change impacts the state of winter roads connecting indigenous communities: Case study of Sakha (Yakutia) Republic / K. S. Kirillina, N. I. Tananaev, A. N. Savvinova, V. A. Lobanov [et al.]. – Текст: непосредственный // Climate Services. – 2023. – Vol. 30. – 100356. – DOI: 10.1016/j.cliser.2023.100356.
6. Груза, Г. В. О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России / Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова, Л. Н. Аристова, Л. К. Клещенко. – Текст: непосредственный // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 10. – С. 2–23.
7. Лемешко, Н. А., Белокопытова М.А. Анализ достоверности и точности современных модельных сценариев климата для юга европейской территории России / Н. А. Лемешко, М. А. Белокопытова // Экологическая деятельность и экологическое просвещение: региональный аспект (материалы всероссийской научной конференции). – Санкт-Петербург, Издательство ЛГУ им. А. С. Пушкина. – 2020. – С. 136–140. – Текст: непосредственный.
8. Кириллина, К. С. Оценка будущего климата Республики Саха (Якутия) / К. С. Кириллина, В. А. Лобанов, Н. Е. Сердитова. – Текст: непосредственный // Ученые записки РГГМУ. – 2015. – № 40. – С. 113–126.
9. Кулаков, М. Ю. Верификация данных реанализа NCEP/NCAR по результатам наблюдений на дрейфующих станциях «Северный полюс» / М. Ю. Кулаков, А. П. Макштас, С. В. Шутин. – Текст: непосредственный // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2013. – № 1(95). – С. 88–96.
10. Васильев, М. С. Сравнение приземной температуры воздуха в Якутии по данным реанализа и наземных наблюдений / М. С. Васильев, С. В. Николашкин, Р. Р. Каримов. – Текст: непосредственный // Вестник СВФУ. – 2014. – Т. 14. – № 5. – С. 82–88.
11. Гидрометцентр РФ. – URL : <https://meteoinfo.ru/climatecities>, свободный (дата обращения : 11.03.2023). – Электронные данные: электронные.
12. Kalnay, E. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project / E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins [et al.]. – Текст: непосредственный // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1996. – Vol. 77(3). – P. 437–472. – DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437: TNYRP>2.0.CO;2.
13. Muñoz-Sabater, J. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications / J. Muñoz-Sabater, E. Dutra, A. Agustí-Panareda, C. Albergel [et al.]. – Текст: непосредственный // Earth System Science Data. – 2021. – Vol. 13. – P. 4349–4383. – DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
14. Harris, I. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset / I. Harris, T. J. Osborn, P. Jones, D. Lister. – Текст: непосредственный // Scientific Data. – 2020. – Vol. 7. – 109. – DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
15. Fan, Y. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present / Y. Fan, H. van den Dool. – Текст: непосредственный // Journal of Geophysical Research: Atmosphere. – 2008. – Vol. 113. – D01103. – DOI: 10.1029/2007JD008470.
16. RStudio: Integrated Development for R, v.1.2.5042. 2020. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. – URL: <http://www.rstudio.com/>. – Электронная программа: электронная.
17. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. – 2020. – URL : <https://www.R-project.org/> (дата обращения: 10.01.2023). – Электронная программа: электронная.
18. Sumner, M. tidync: A Tidy Approach to ‘NetCDF’ Data Exploration and Extraction. R package version 0.3.0.9001. / Sumner, M. – 2023. – URL : <https://docs.ropensci.org/tidync/> (дата обращения: 12.05.2023). – Электронная программа: электронная.
19. QGIS Development Team, 2023. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. – URL : <http://qgis.osgeo.org> (дата обращения: 12.05.2023). – Электронная программа: электронный.
20. Макаров В.С. Анализ зимних температурных инверсий в горно-котловинных ландшафтах Оймяконского нагорья // В. С. Макаров. – Текст: непосредственный // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». – 2020. – № 2. – С. 40–45.

21. Esau, I. Urban heat islands in the Arctic cities: an updated compilation of in situ and remote-sensing estimations / I. Esau, V. Miles, A. Soromotin, O. Sizov // *Advances in Science and Research*. – 2021. – Vol. 18. – P. 51–57. – DOI: 10.5194/asr-18-51-2021.
22. Varentsov, M. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city / M. Varentsov, P. Konstantinov, A. Baklanov, I. Esau // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2018. – Vol. 18(23). – P. 17573–17587.
23. Константинов, П.И. Городские острова тепла российской Федерации: основные характеристики и проблемы изучения / П. И. Константинов, Е. А. Куканова. – Другой вид содержания: электронное // Доклад на Международной конференции ENVIROMIS'2014. – URL: http://www.scert.ru/enviromis/2014/presentation/Presentation/Conference/Session_5/Oral_reports/Konstantinov.pdf (дата обращения: 12.05.2023).

References

1. Bozhilina, E. A. Principy geograficheskoy kartografii v sovremennoy klimatologii / E. A. Bozhilina, V. N. Sorokina. – Tekst: neposredstvennyy // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografija*. – 2012. – № 1. – S. 61–66.
2. Zhil'cova, E. L. O tochnosti vosproizvedeniya temperatury i osadkov na territorii Rossii global'nymi klimaticheskimi arhivami / E. L. Zhil'cova, O. A. Anisimov. – Tekst: neposredstvennyy // *Meteorologiya i gidrologiya*. – 2009. – № 10. – S. 79–89.
3. Rukovodstvo po specializirovannomu klimatologicheskomu obsluzhivaniyu jekonomiki: rukovodstvo / pod redakciej N. V. Kobyshevoj; Glavnaja geofizicheskaja observatorija im. A. I. Voejkova. – Sankt-Peterburg: Rosgidromet, 2008. – 336 s. – Tekst: neposredstvennyy.
4. Bulavina, A. S. Prostranstvenno-vremennoj analiz klimaticheskikh faktorov formirovaniya stoka Obi / A. S. Bulavina. – Tekst: neposredstvennyy // *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN*. – 2022. – Vypusk 10. *Okeanologiya*. – S. 15–26.
5. Kirillina, K.S. Climate change impacts the state of winter roads connecting indigenous communities: Case study of Sakha (Yakutia) Republic / K. S. Kirillina, N. I. Tananaev, A. N. Savvinova, V. A. Lobanov [et al.]. – Tekst: neposredstvennyy // *Climate Services*. – 2023. – Vol. 30. – 100356. – DOI: 10.1016/j.cliser.2023.100356.
6. Gruza, G. V. O neopredelennosti nekotoryh scenarnyh klimaticheskikh prognozov temperatury vozduha i osadkov na territorii Rossii / G. V. Gruza, Je. Ja. Ran'kova, L. N. Aristova, L. K. Kleshhenko. – Tekst: neposredstvennyy // *Meteorologiya i gidrologiya*. – 2006. – № 10. – S. 2–23.
7. Lemeshko, N. A., Belokopytova M.A. Analiz dostovernosti i tochnosti sovremennykh model'nykh scenarijev klimata dlja juga evropejskoj territorii Rossii / N. A. Lemeshko, M. A. Belokopytova // *Jekologicheskaja dejatel'nost' i jekologicheskoe prosveshhenie: regional'nyy aspekt (materialy vsrossijskoj nauchnoj konferencii)*. – Sankt-Peterburg, Izdatel'stvo LGU im. A. S. Pushkina. – 2020. – S. 136–140. – Tekst: neposredstvennyy.
8. Kirillina, K. S. Ocenka budushhego klimata Respubliki Saha (Jakutija) / K.S. Kirillina, V. A. Lobanov, N. E. Serditova. – Tekst: neposredstvennyy // *Uchenye zapiski RGGMU*. – 2015. – № 40. – S. 113–126.
9. Kulakov, M. Ju. Verifikacija dannyh reanaliza NCEP/NCAR po rezul'tatam nabljudenij na drevfujushhih stancijah «Severnyj poljus» / M. Ju. Kulakov, A. P. Makshtas, S. V. Shutilin. – Tekst: neposredstvennyy // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. – 2013. – № 1(95). – S. 88–96.
10. Vasil'ev, M. S. Sravnenie prizemnoj temperatury vozduha v Jakutii po dannyh reanaliza i nazemnyh nabljudenij / M. S. Vasil'ev, S. V. Nikolashkin, R. R. Karimov. – Tekst: neposredstvennyy // *Vestnik SVFU*. – 2014. – T. 14. – № 5. – S. 82–88.
11. Gidrometcentr RF. – URL: <https://meteoinfo.ru/climatecities>, svobodnyj (data obrashhenija: 11.03.2023). – Jelektronnye dannye: jelektronnye.
12. Kalnay, E. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project / E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins [et al.]. – Tekst: neposredstvennyy // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 1996. – Vol. 77(3). – P. 437–472. – DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437: TNYRP>2.0.CO;2.

13. Muñoz-Sabater, J. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications / J. Muñoz-Sabater, E. Dutra, A. Agustí-Panareda, C. Albergel [et al.]. – Tekst: neposredstvennyj // Earth System Science Data. – 2021. – Vol. 13. – P. 4349–4383. – DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
14. Harris, I. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset / I. Harris, T. J. Osborn, P. Jones, D. Lister. – Tekst: neposredstvennyj // Scientific Data. – 2020. – Vol. 7. – 109. – DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
15. Fan, Y. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present / Y. Fan, H. van den Dool. – Tekst: neposredstvennyj // Journal of Geophysical Research: Atmosphere. – 2008. – Vol. 113. – D01103. – DOI: 10.1029/2007JD008470.
16. RStudio: Integrated Development for R, v.1.2.5042. 2020. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. – URL: <http://www.rstudio.com/>. – Jelektronnaja programma : jelektronnaja.
17. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. – 2020. – URL: <https://www.R-project.org/> (data obrashhenija: 10.01.2023). – Jelektronnaja programma: jelektronnaja.
18. Sumner, M. tidync: A Tidy Approach to ‘NetCDF’ Data Exploration and Extraction. R package version 0.3.0.9001. / Sumner, M. – 2023. – URL : <https://docs.ropensci.org/tidync/> (data obrashhenija: 12.05.2023). – Jelektronnaja programma : jelektronnaja.
19. QGIS Development Team, 2023. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. – URL: <http://qgis.osgeo.org> (data obrashhenija: 12.05.2023). – Jelektronnaja programma: jelektronnyj.
20. Makarov V.S. Analiz zimnih temperaturnyh inversij v gorno-kotlovinyh landshaftah Ojmjakonskogo nagor’ja // V. S. Makarov. – Tekst: neposredstvennyj // Vestnik Severo-Vostochnogo federal’nogo universiteta im. M.K. Ammosova. Serija «Nauki o Zemle». – 2020. – № 2. – S. 40–45.
21. Esau, I. Urban heat islands in the Arctic cities: an updated compilation of in situ and remote-sensing estimations / I. Esau, V. Miles, A. Soromotin, O. Sizov // Advances in Science and Research. – 2021. – Vol. 18. – P. 51–57. – DOI: 10.5194/asr-18-51-2021.
22. Varentsov, M. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city / M. Varentsov, P. Konstantinov, A. Baklanov, I. Esau // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2018. – Vol. 18(23). – P. 17573–17587.
23. Konstantinov, P.I. Gorodskie ostrova tepla rossijskoj Federacii: osnovnye harakteristiki i problemy izucheniya / P. I. Konstantinov, E. A. Kukanova. – Drugoj vid sodержaniya: jelektronnoe // Doklad na Mezhdunarodnoj konferencii ENVIROMIS’2014. – URL: http://www.scert.ru/enviromis/2014/presentation/Presentation/Conference/Session_5/Oral_reports/Konstantinov.pdf (data obrashhenija: 12.05.2023).

Сведения об авторах

ТАНАНАЕВ Никита Иванович – к.г.н., заведующий лабораторией по изучению климата и экосистем северных регионов Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, в.н.с. Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, e-mail: tanni@s-vfu.ru

TANANAEV Nikita Ivanovich – Candidate of Geographic Sciences, Head, Climate and Northern Regions Ecosystems Research Lab, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University; Leading Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, e-mail: tanni@s-vfu.ru

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 911.3

DOI 10.25587/SVFU.2023.30.2.009

В. Ю. Кузин

Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

e-mail: vadim-13.06@yandex.ru

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ В ПОСТСОВЕТСКИЙ ПЕРИОД

Аннотация. Постсоветское социально-экономическое развитие России имело разнонаправленный характер. При этом выросло значение сглаживаемых факторов конкурентоспособности, значение отдельных центров и отраслей. Региональное измерение подобных тенденций чаще всего обнаруживает резко возросшие градиенты социально-экономического развития, что отражается в спектре процессов пространственного развития. Крайним в этом спектре является пространственная поляризация. Она стала фактическим трендом в развитии всей страны. При этом если её специфика на западе страны исследовалась довольно активно, то Дальний Восток в этом плане фактически не изучен. Данная статья направлена на устранение этого недостатка. Предварительно рассмотрены основные проблемы социально-экономического развития этой территории и специфический для неё процесс регионополизации. Он раскрыт через анализ долей в важнейших социально-экономических показателях региональных центров Дальнего Востока. Для оценки пространственной поляризации был применён авторская методика четырёхэтапной оценки и предложена итоговая формула. Статистической базой стал сборник «Регионы России. Социально-экономические показатели». Полученный индекс пространственной поляризации анализируется и делаются выводы о специфике его формирования, функционирования и устойчивости. Также он был визуализирован с применением картографического метода посредством QGIS. В итоге было определено 4 типа регионов по уровню пространственной поляризации: слабо поляризованный (2 региона), средне поляризованный (3 региона), высоко поляризованный (4 региона), максимально-поляризованный (2 региона). Анализируется каждый из типов, отмечаются факторы и специфика их формирования и функционирования. Делается вывод о превалировании качественных различий между типами и значительных перспективах дальнейшего исследования пространственной поляризации.

Ключевые слова: пространство, регион, Дальний Восток, тренды, поляризация, регионополизация, метрополизация, фрагментация, ГИС, индикаторы, типы.

V. Yu. Kuzin

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

e-mail: vadim-13.06@yandex.ru

AN EVALUATION OF THE RUSSIAN FAR EAST SPATIAL POLARIZATION IN THE POST-SOVIET PERIOD

Abstract. The post-Soviet social and economic development of Russia had a multidirectional character. At the same time the importance of smoothed factors of competitiveness, the importance of individual centers and industries increased. Regional measurement of such trends the most frequently discovers the rose sharply gradients of social and economic development, which reflect in the spatial development processes spectrum.

Spatial polarization is the cornerstone in this spectrum; it has become an actual trend in the development of the whole country. Whereas its specifics in the west of the country have been researched quite actively, the Russian Far East in this respect has not been actually studied. This article is directed to eliminate this shortcoming. The main problems of socio-economic development of this territory and the process of regionalization specific to it were preliminarily considered. The regionalization specific process was discovered through the analysis of sharps in the most socio-economic indicators of the regional centers in the Russian Far East. For evaluating the spatial polarization we used the proprietary technology of four-step evaluation and the final formula is proposed. The statistical base was the collection "Regions of Russia. Socio-economic Indicators". The obtained index of spatial polarization was analyzed and conclusions about the specifics of its formation, functioning and sustainability were made. The spatial polarization index was visualized using QGIS cartographical method. As a result, 4 types of regions were identified by the level of spatial polarization: weakly polarized (2 regions), medium polarized (3 regions), highly polarized (4 regions), maximum polarized (2 regions). Each type was analyzed, the factors and specific of their creation and functioning were noted. The conclusion about the prevalence of qualitative differences between the types and significant prospects for further research into spatial polarization was made.

Keywords: space, region, Russian Far East, trends, polarization, regionalization, metropolization, fragmentation, geoinformation systems, indicators, types.

Введение

Современный мир – это мир контрастов всего спектра социально-экономических процессов, явлений, отношений. Проявляясь в разных формах, они дифференцируют пространство, притом градиенты различий часто возрастают. Это «раскалывает» и «деформирует» пространство, формируя широкий и разнонаправленный спектр результатов неравномерного развития.

Оно имеет фундаментальный характер. Однако условия и факторы его функционирования, как и продуцируемые в результате процессы и их последствия, отличаются. В условиях глобализации эта фундаментальность не только сохранилась, но и во многом усилилась.

В совокупности это обуславливает актуальность исследования неравномерности пространственного развития, его различных выраженных процессов – дифференциации, асимметрии, выравнивания, поляризации. Несмотря на длительную историю исследования последней, она продолжает привлекать внимание и выступать выраженным феноменом общественно-географических исследований.

При этом задачу исследования поляризации актуализировали социально-экономико-политические преобразования в постсоветских странах. Не является исключением и Россия, в которой факторы конкурентоспособности отдельных территорий только усилились, увеличивая контрасты их социально-экономического развития.

Это факт неоднократно исследовался отечественными экономико-географами, однако, несмотря на значительный объем работ, некоторые территории изучались крайне редко. К таковым относится и Дальний Восток (рассматривается в границах ДВФО на 2023 год). Здесь пространственное сжатие проявилось особенно сильно, а диспаритеты развития между отдельными территориями стали крайне велики, что одновременно усиливает центр-периферийные процессы, ранее нивелированные административно-командной системой.

Социально-экономические проблемы Дальнего Востока и регионополизация

Для оценки пространственной поляризации важен не просто набор показателей, а контекст, в котором происходило социально-экономическое развитие, и которое способствовало данному пространственному процессу. И здесь важно рассмотрение проблем. Генерализовано можно выделить следующие основные группы проблем социально-экономического развития Дальнего Востока (с тезисной их характеристикой):

1. демографические – вызваны общим для всей страны снижением рождаемости и ростом смертности, что вызвало естественную убыль, а также миграционной убылью, ставшая устойчивой для всех регионов (и особенно – выраженной для северных). Пополнявшийся во многом

за счёт миграции населения Дальний Восток в постсоветское время из-за комплекса причин стал миграционно непривлекательной зоной, более того – стал ещё и терять местное население, что ухудшило демографическую ситуацию. В целом же, депопуляционные процессы оказали серьёзное влияние на все остальные группы проблем;

2. социальные – негативные процессы социального развития (рост криминогенности, увеличение смертности от алкоголизма и наркомании, рост числа самоубийств и т.д.); ухудшение качества человеческого капитала; формирование безработицы, для многих территорий – хронической. Результатом стало «социальное опустынивание» многих территорий, особенно периферийных, испытавших маргинализацию и социальную деградацию. Кроме того, произошло то, что можно назвать «обратной инверсией» идеологии отношения территориальных социумов к пространству: от «обживания» (постоянного проживания, создания условий и для последующих поколений) к «колонизации» (потребительского отношения, осознание временности проживания);

3. структурно-экономические – усиление значения факторов конкурентоспособности (наличие ресурсов, геоположение, человеческий капитал, «фактор колен» и т.д.); значительное увеличение роли ресурсодобывающих отраслей (добычи полезных ископаемых, рыболовства, лесного хозяйства); упрощение экономики на всех территориальных уровнях; формирование параллельной «теневой» экономики. В целом это обширную группу проблем можно охарактеризовать одним словом – упрощение. Сырьевой характер экономики, комплиментарный Дальнему Востоку в досоветский период фактически вернулся. Отрасли более высоких переделов оказались в менее выгодных условиях и без значительной господдержки. А деградации локальных экономических систем вкупе со слабой поддержкой местного бизнеса привели к уходу реально существующего производства в «тень»;

4. экистические – негативная трансформация системы расселения, проявившаяся в разряжении сети населённых пунктов, уменьшении их людности. Для многих же территорий стала реальностью полная ликвидация населённых мест (бывшие военные городки, посёлки при горнодобывающих производствах и т.д.), а, соответственно – и расселения как такового. В редких же случаях эти системы наоборот – развивались, концентрируя экономические мощности и население, что характерно для городских агломераций региональных центров. При этом целостная системы расселения, формирование которой объективно затрудняется географической спецификой территории, не только не продолжила формироваться, а скорее фрагментировалась [1], что очевидно затрудняет развитие Дальнего Востока [2];

5. транспортные – снижение уровня внутренней и внешней транспортной доступности. При неизменном физическом расстоянии экономически Дальний Восток стал ещё более «дальним». Сухопутное транспортное сообщение с остальной частью страны базируется на немногочисленных железных дорогах (Транссиб, БАМ, АЯМ), приуроченных (за исключением последнего) к южной части территории и автодорогах, имеющих ту же локализацию и несколько транспортных разрывов. Велико – по вполне объективным причинам – значение авиации, самого скоростного, правда и дорогого вида транспорта. Специфика Дальнего Востока – в её высоком значении даже на внутрирегиональном уровне. Происходит это из-за слаборазвитой в целом транспортной инфраструктуры. Таким образом, что внешняя доступность территории исследования (из вне-дальневосточных регионов), что внутренняя (в самих регионах) оставляет желать лучшего. К тому же, переход к рынку «отдалил» жителей Дальнего Востока от остальной части страны за счёт существенного роста цен, что сделало пространство более «вязким» и труднопреодолимым [3]. Есть правда и положительные моменты – в постсоветское время стала действовать система погранпереходов и началось приграничное сотрудничество вкупе с притоком иностранных туристов, а также в последние годы идёт модернизация авто- и железных дорог, а также взлётно-посадочных полос и портов;

6. возрастающее влияние внешних акторов (ТНК, крупнейших федеральных компаний) – иными словами, фактически решения о развитии и освоении территории принимаются не сами-

ми регионами/муниципальными образованиями, а внешними агентами, подчас удалёнными на тысячи километров. Экстerrиториальность крупного капитала, ставшая реальностью постсоветской России, является таковой и для Дальнего Востока [4]. Фактическими «хозяевами» наиболее высокодоходных активов становятся московские или, до недавних пор, – международные структуры. А логика и стратегия их работы и развития не всегда увязаны с таковыми же на региональном и местном уровнях. Это нельзя считать какой-то спецификой именно территории исследования, однако на это накладывается уже отечественная особенность – выплаты части налогов по месту регистрации штаб-квартиры – а это уже объективно снижает налоговый и бюджетный потенциалы регионов;

7. несистемная региональная политика – в целом была характерна для всей страны. Для Дальнего Востока же отсутствие реально проводимой, а не декларируемой, селективной госрегиональной политики привело к многочисленным негативным последствиям, обнаруживаемым, фактически, во всех ранее перечисленных (да и в нижеследующей то же) группах проблем. Но здесь также необходимо отметить, что наметились позитивные изменения – и создание специализированного Министерства по делам Дальнего Востока, и формирование территорий опережающего развития (ТОРов), и программа «дальневосточный гектар»;

8. пространственное сжатие территории – фрагментирование социально-экономического развития; возросшая регионополизация; усиление пространственной поляризации. Весьма обширная группа проблем, которую в общем виде можно представить в виде такой цепочки следствий: уничтожение административно-командной системы – разрушение госрегиональной политики – шоковые и радикальные реформы во всех сферах – открытие мировому рынку – селективное влечение отраслей и производств в него – опережающее развитие территорий с таковыми – отток населения и деградация экономики «неперспективных» территорий – формирование немногочисленных центров развития и обширной периферии – усиление этого процесса с течением времени. Измерить и продемонстрировать это можно различными способами, однако одним из наиболее явных (и что важно – простых) является анализ развития региональных центров, проводимый на сопоставлении их долей в общерегиональных показателях. Это фактическое и зримое проявление регионополизации. С этой целью были использованы материалы статистических сборников «Регионы России. Основные социально-экономические характеристики городов». Временная база – 2010-2021 гг. с шагом в два года (так сборник издаётся по плану). Непосредственно были использованы показатели-доли в: численности населения, инвестициях в основной капитал, наличии основных фондов организаций, вводе жилых домов, оборот розничной торговли. Выбор данных показателей обусловлен несомненной важностью и индикаторной их ролью как важных социально-экономических индикаторов. Результат представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Доли региональных центров ДВФО в показателях социально-экономического развития своих регионов по годам (в %) [5]

Города	2010	2011	2013	2015	2017	2019	2021
Численность населения							
Анадырь	26,8	26,5	27,8	29,7	31,6	31,5	30,1
Биробиджан	42,7	43,7	43,9	44,9	45,4	45,4	44,8
Благовещенск	26,5	26,9	27,8	28,5	28,9	29,3	29,8
Владивосток	31,5	31,9	32,5	32,8	33,1	33,5	33,8
Магадан	65,4	66,1	67,2	67,6	69,2	65,7	66,4
Петропавловск-Камчатский	55,8	56,2	57,4	57,2	57,4	57,4	58
Улан-Удэ	41,6	42,4	43,3	43,8	44,2	44,5	44,4
Хабаровск	43	43,6	44,9	45,8	46,5	46,9	47,2
Чита	29,3	29,8	30,8	31,7	32,5	33,2	33,5

Южно-Сахалинск	36,5	37,6	39,3	39,7	40,6	41,1	41,7
Якутск	28,1	29,1	30,8	31,7	32,3	33,2	34,4
Инвестиции в основной капитал							
Анадырь	32,8	25,4	58,2	56,4	60,1	60,8	63,7
Биробиджан	15,8	8,4	25	51,6	50,6	40,7	57,9
Благовещенск	17,2	28,3	20,6	19,3	7,5	4,7	11,6
Владивосток	49,4	43,6	65,1	42,7	43,3	47	48
Магадан	35,1	26,5	13,6	8,8	13,3	15	28
Петропавловск-Камчатский	84,5	77,2	68,6	56,4	48,1	54,3	68,8
Улан-Удэ	48,3	42,6	44,7	41	60,5	65	63,4
Хабаровск	29,7	30,4	50,4	53,5	67,4	54,1	55,5
Чита	22,2	30,8	22,1	12,9	69,1	47,1	45,2
Южно-Сахалинск	9,8	10,2	21	32,4	22,9	20,9	33,5
Якутск	24,1	25,4	23,9	25,3	11,5	12,5	13,8
Наличие основных фондов организаций							
Анадырь	57,8	64,3	58,6	56,5	59,2	57,3	53,2
Биробиджан	59,8	60,8	77,7	58,7	79,1	79,2	78,5
Благовещенск	22,7	26,9	32,7	24,1	22,2	25,2	25,1
Владивосток	56,3	56,3	70,3	71,7	70,5	67,9	66,2
Магадан	67,1	67,6	75,6	78,3	76,1	63,5	63,4
Петропавловск-Камчатский	61,6	70,1	78,4	78	81,9	79,1	78,7
Улан-Удэ	37	36,6	41,2	46	48,5	50,5	54,3
Хабаровск	69	73,9	76,8	75,9	76,2	77,1	76,4
Чита	67	81,9	70,8	67,1	56,2	50,8	55,8
Южно-Сахалинск	19,4	28,7	24,6	98,2	96,6	93,1	92,5
Якутск	40,6	35,7	24,6	23,4	20,8	19,2	18,1
Ввод жилых домов							
Анадырь	-	-	-	-	-	-	4,2
Биробиджан	83	75,9	47,9	45,1	67,6	39,8	44,4
Благовещенск	66,1	65	55,1	58	51,9	41,3	19,5
Владивосток	62,4	64,4	57,5	26,9	24,9	41,1	51,3
Магадан	73	82,1	39,8	45	70,3	39,8	97
Петропавловск-Камчатский	70,6	84,3	69,9	57,6	33,3	27,7	17,8
Улан-Удэ	54,8	53,4	54,6	58,7	44,4	47,6	68,5
Хабаровск	90,2	86,7	65,6	63,5	59,4	67,1	73,5
Чита	56,3	57,1	60,5	58,6	43,9	37,9	54,6
Южно-Сахалинск	71,1	30,3	39,8	38,1	59,1	59,2	57,7
Якутск	54,4	51,2	56	56,3	50,1	63,3	53,3
Оборот розничной торговли							
Анадырь	26	24,8	42,7	52,9	51,9	56,1	53
Биробиджан	70,1	73,8	79,9	81	83,9	83	98,9
Благовещенск	11,9	60,5	66,8	71,6	73,5	71,4	67,3
Владивосток	52	49,4	43,4	53,4	86,8	81,8	78,5
Магадан	82,8	83,7	82,1	86,2	88,3	88,7	90
Петропавловск-Камчатский	71,2	75,1	80,3	81,2	82,6	83,6	87
Улан-Удэ	55,8	57,2	56	62,9	67,8	56	61,6
Хабаровск	82,7	18,4	81,5	79,1	87,3	77,9	70
Чита	54,8	50	54	63,5	63,5	57,9	63,5
Южно-Сахалинск	76,4	72,3	71,1	7,9	79,3	43,2	74,7
Якутск	50,3	47,9	9,6	62,9	59,5	58,4	63,1

Анализ данных табл. 1 позволяет сделать следующие основные выводы по рассматриваемым показателям:

- численность населения – доля в показателе у центров медленно, но устойчиво растёт, при этом этот рост ускорился с 2013 г.;
- инвестиции в основной капитал – тенденции разноректорны, наблюдается как рост (иногда – кратный), так и выраженное сокращение показателя;
- наличие основных фондов организаций – для большей части центров характерен рост, при этом за исключением Благовещенска и Якутска, величина показателя не менее 50 %;
- ввод жилых домов – доли центров чаще всего снижается, за некоторым исключением (в виде Магадана и Улан-Удэ);
- оборот розничной торговли – в основном устойчиво возрастает, несмотря на отдельные колебания, и везде превышает половину (особенно выделяется Биробиджан где этот показатель около 100 %).

В среднем же к настоящему времени, региональный центр концентрирует 30-40 % населения, около 30 % инвестиций, 50-60 % основных фондов организаций, 30-50 % ввода жилых домов, 60-70 % оборота розничной торговли.

По сути, в настоящее время в ДВФО фактически наблюдается картина формирования мегарегионов (термин предложен был Р.Флоридой для обозначения современной наднагломерационной формы пространственного образования с крайне высокой концентрацией технологии, талантов, экономики [6]). Фактически экономики регионов ДВФО становятся синонимами их региональных центров, вплоть до слияния (правда здесь можно возразить, отметив неотмечаемую статистикой «теневую экономику», которая, вероятно, нивелировала бы эти градиенты). При этом формируется очевидное противоречие – формирование мегарегионов как пространственных структур в мире происходит за счёт развития науки и технологий, новейших производств, быстрого внедрения инноваций, использования глобальных связей, использования креатива и талантов [6-7].

На Дальнем Востоке же это происходит инвертировано – за счёт селективного развития, фактической маргинализации периферийных территорий и сопутствующих этому фрагментации пространства и неуправляемого пространственного «сжатия». Именно это обуславливает доминирование региональных центров, которые и сосредотачивают значительную часть основных экономических фондов, и инвестиционно привлекательны (практически всегда), и являются фактически монопольными центрами торгового обслуживания субъектов [7].

Вследствие этого в них фактически действует определённый «закон насыщения» (по высказыванию Трейвиша А.И. [3]): замедляется жилищное строительство – очевидно, что необходимость его в условиях естественной и миграционной депопуляции невысока, а другие территории из-за известного эффекта «низкой базы» наращивают эту долю.

Дальневосточный центр – регионополис «примагничивает» население и большую часть экономической активности, а также стимулирует строительство и розничную торговлю [7]. Так усиливается регионополизация территории, которая комплиментарна ей исторически и усилена в рыночных условиях.

Усиление регионополизации выступает следствием сложного процесса пространственной поляризации, выраженно проявившей себя на Дальнем Востоке в постсоветское время.

Оценка пространственной поляризации Дальнего Востока

Специального исследования пространственной, касающегося Дальнего Востока в целом не проводилось. Для восполнения этого исследовательского пробела и решения задачи составления индекса пространственной поляризации данной территории были приняты предварительные условия:

- использоваться должны показатели в виде индексов – в соотношении со средними по ДВФО, как демонстрирующие отклонения от среднего и отходящие от несравнимости показателей;
- использоваться должны максимально-доступные последние опубликованные статистические показатели регионов (на 2021 год в данный момент);

- должны будут использоваться общие показатели для всех дальневосточных регионов, а не демонстрирующие специфику лишь некоторых из них;

- индекс будет рассчитываться по состоянию на 2021 год как, во-первых, последний полностью статистически доступный на момент написания работы, а во-вторых, в связи с сомнительностью его расчётов за длительный период и последующим усреднением.

Методика определения индекса пространственной поляризации (ИПП) регионов Дальнего Востока включает четыре этапа:

1) аналитический отбор показателей как позитивно, так и негативно влияющих на социально-экономическое развитие территорий и, в конечном итоге, на его пространственное развитие и поляризацию. В число позитивно влияющих вошли: ВРП на 1 жителя (ВРП, руб. на 1 жителя); уровень инвестиций на 1 жителя (И, руб. на 1 жителя); среднедушевые денежные доходы (Д, руб. на 1 жителя); расходы на охрану окружающей среды (ООС, млн. руб.); сальдированный финансовый результат деятельности организаций (СФ, млн. руб.); объём платных услуг в расчёте на 1 жителя (ПУ, руб. на 1 жителя). В число отрицательно влияющих были включены: уровень безработицы (Б, % в среднем за год); коэффициент младенческой смертности (КМС, в ‰); коэффициент демографической нагрузки неработающими возрастами (КДН, чел. на 1000 чел. трудоспособного возраста); естественный (ЕП, в ‰) и миграционный приросты (МП, в ‰) (последние могут иметь как положительный, так и отрицательный знак);

2) расчёт индексов – деление всех показателей на средние по ДВФО значения;

3) ранжирование показателей (для положительно влияющих – чем выше показатель, тем выше ранг – за максимальный принята 1, за минимальный – 11, для отрицательно влияющих – чем ниже показатель, тем выше ранг);

4) суммирование положительно и отрицательно влияющих показателей между собой с последующим делением первой суммы на вторую. Соответственно, чем выше этот показатель, тем выше уровень пространственной поляризации региона в сравнении с ДВФО в целом. В общем виде, используемая для расчёта формула такова:

$$ИПП = \frac{ВРП+И+Д+ООС+СФ+ПУ}{Б+КМС+ЕП+МП} \quad (1)$$

Данные этапа 1 приведены в табл. 2, этапа 2 – в табл. 3, этапа 3 – в табл. 4, результирующие этапа 4 – в табл. 5.

Таблица 2 – Значение показателей, используемых в расчёте индекса пространственной поляризации (2021 г.) [8]

Регион	ВРП	И	Д	ООС	СФ	ПУ	Б	КМС	КДН	ЕП	МП
Республика Бурятия	307558,8	73498	28314	4181	40056	8265	9,5	4,3	769	-10,8	-1,3
Республика Саха (Якутия)	1168152,5	393055	50369	19456	363426	7980	6,9	3,3	674	-6,5	8,6
Забайкальский край	402594,6	154079	29827	5207	86001	4601	9,3	7,5	717	-6,6	-5,2
Камчатский край	942802,0	234524	60794	3299	68203	5536	3,5	4,8	611	-10	7,8
Приморский край	582950,7	131810	40843	8913	201015	8717	4,2	5,5	699	-6,8	-0,2
Хабаровский край	658239,5	187569	44108	9652	104135	7372	3,1	4,4	685	-8,7	5
Амурская область	571362,1	491599	39628	5568	47200	5426	5,2	4,8	707	-6,6	-3
Магаданская область	2035007,0	495339	80979	4720	98283	9366	4,9	5,8	637	-4,9	-2,8
Сахалинская область	2059206,5	497057	63854	6765	117745	13408	5,2	2,9	714	-1,5	1,5
Еврейская автономная область	400340,5	104138	30297	614	10323	8115	5,6	11,7	725	1,6	-9,1
Чукотский автономный округ	2404271,2	957215	99905	1547	56300	10658	2,6	15,8	562	-4,4	11,1
ДВФО	307558,8	338171	51720	6357	108426	8131	5,5	6,4	682	-5,9	1,1

ВРП – валовый региональный продукт (руб. на 1 жителя)

И – инвестиции уровень инвестиций (руб. на 1 жителя)

Д – среднедушевые денежные доходы (руб. на 1 жителя)

ООС – расходы на охрану окружающей среды (млн. руб.)

СФ – сальдированный финансовый результат деятельности организаций (млн. руб.)

ПУ – объём платных услуг (руб. на 1 жителя)

Б – уровень безработицы (в среднем за год в %)

КМС – коэффициент младенческой смертности (в ‰)

КДН – коэффициент демографической нагрузки неработающими возрастами (чел. на 1000 чел. трудоспособного возраста)

ЕП – естественный прирост (в ‰)

МП – миграционный приросты (в ‰)

Таблица 3 – Индексы показателей, используемых в расчёте индекса пространственной поляризации (2021 г.) [8]

Регион	ВРП	И	Д	ООС	СФ	ПУ	Б	КМС	КДН	ЕП	МП
Республика Бурятия	1	0,22	0,55	0,66	0,37	1,02	1,73	0,67	1,13	1,83	-1,18
Республика Саха (Якутия)	3,80	1,16	0,97	3,06	3,35	0,98	1,25	0,52	0,99	1,10	7,82
Забайкальский край	1,31	0,46	0,58	0,82	0,79	0,57	1,69	1,17	1,05	1,12	-4,73
Камчатский край	3,07	0,69	1,18	0,52	0,63	0,68	0,64	0,75	0,90	1,69	7,09
Приморский край	1,90	0,39	0,79	1,40	1,85	1,07	0,76	0,86	1,02	1,15	-0,18
Хабаровский край	2,14	0,55	0,85	1,52	0,96	0,91	0,56	0,69	1,00	1,47	4,55
Амурская область	1,86	1,45	0,77	0,88	0,44	0,67	0,95	0,75	1,04	1,12	-2,73
Магаданская область	6,62	1,46	1,57	0,74	0,91	1,15	0,89	0,91	0,93	0,83	-2,55
Сахалинская область	6,70	1,47	1,23	1,06	1,09	1,65	0,95	0,45	1,05	0,25	1,36
Еврейская автономная область	1,30	0,31	0,59	0,10	0,10	1,00	1,02	1,83	1,06	-0,27	-8,27
Чукотский автономный округ	7,82	2,83	1,93	0,24	0,52	1,31	0,47	2,47	0,82	0,75	10,09

Сокращения – аналогичны приложению 1.

Таблица 4 – Ранги показателей, используемых в расчёте индекса пространственной поляризации (2021 г.) [8]

Регион	ВРП	И	Д	ООС	СФ	ПУ	Б	КМС	КДН	ЕП	МП
Республика Бурятия	11	11	11	8	10	5	10	3	10	10	7
Республика Саха (Якутия)	4	5	5	1	1	7	8	2	4	5	2
Забайкальский край	9	8	10	6	6	11	9	8	8	6	10
Камчатский край	5	6	4	9	7	9	3	5	2	9	3
Приморский край	7	9	7	3	2	4	4	6	6	7	6
Хабаровский край	6	7	6	2	4	8	2	4	5	8	4
Амурская область	8	4	8	5	9	10	6	5	7	6	9
Магаданская область	3	3	2	7	5	3	5	7	3	4	8
Сахалинская область	2	2	3	4	3	1	6	1	8	2	5
Еврейская автономная область	10	10	9	11	11	6	7	9	9	1	11
Чукотский автономный округ	1	1	1	10	8	2	1	10	1	3	1

Сокращения – аналогичны приложению 1.

Таблица 5 – Индекс пространственной поляризации регионов Дальнего Востока

Регион	Индекс пространственной поляризации
Республика Бурятия	1,40
Республика Саха (Якутия)	1,10
Забайкальский край	1,22
Камчатский край	1,82
Приморский край	1,10
Хабаровский край	1,43
Амурская область	1,33
Магаданская область	0,85
Сахалинская область	0,68
Еврейская автономная область	1,54
Чукотский автономный округ	1,44

Однако гораздо удобнее ИПП визуализировать не в виде таблицы, а при помощи картографического метода. Общеизвестна роль картографического анализа при выявлении закономерностей территориальной дифференциации, пространственных отношений, всевозможных пространственных структур и территориальных потоков.

С помощью ГИС-программы QGIS был отображён полученный ИПП на уровне регионов Дальнего Востока. Он представлен на рис.

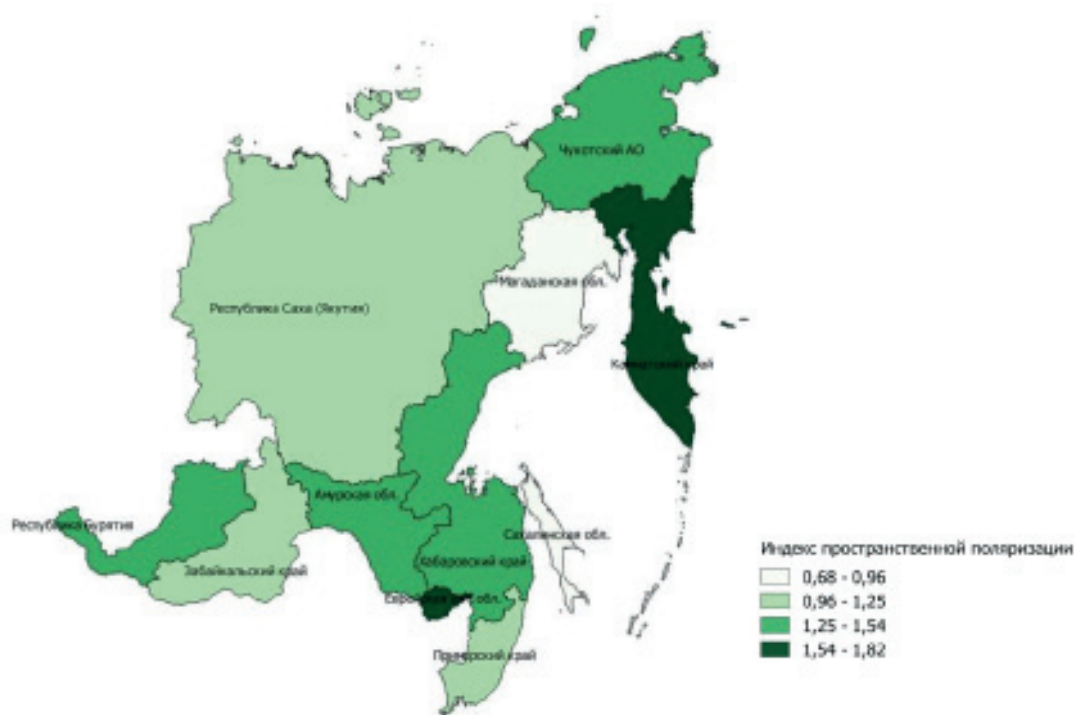


Рис. Индекс пространственной поляризации регионов Дальнего Востока (2021 г., сост. автором)

Fig. Index of spatial polarization of the regions of the Russian Far East (2021, compiled by the author)

Анализ полученного ИПП позволяет сделать следующие выводы:

- пространственная поляризация прочно «укоренилась» на Дальнем Востоке, о чём говорит относительно небольшой разброс значений показателя. Очевидно, это связано с действием устойчиво-влияющих факторов поляризации, усиленных постсоветскими тенденциями развития;

- лидерство Камчатского края и Еврейской автономной области было ожидаемым – в первом случае – это регион с суровыми природно-климатическими условиями и изначально точечным освоением, во втором же случае – связано с метрополитенской ролью Биробиджана;

- минимальные значения у Магаданской и Сахалинской областей объяснимы значительным инвестиционным притоком, создающим новые производства сырьевого сектора и привлекающим население вместе с небольшой численностью имеющегося населения («эффект низкой базы»);

- невысокая транспортная связность и, очевидно, не лучшим образом работающие экономические связи соседствующих регионов тормозят «ретрансляцию развития» – регионы с минимальной поляризацией не сглаживают её у своих соседей.

Можно выделить следующие типы регионов Дальнего Востока по уровню пространственной поляризации:

- 0,68-0,96 – **слабо поляризованный**: 2 региона (Магаданская и Сахалинская области);
- 0,96-1,25 – **средне поляризованный**: 3 региона (Республика Саха (Якутия), Забайкальский и Приморский края);
- 1,25-1,54 – **высоко поляризованный**: 4 региона (Республика Бурятия, Хабаровский край, Амурская область, Чукотский автономный округ);
- 1,54-1,82 – **максимально-поляризованный**: 2 региона (Еврейская автономная область, Камчатский край).

Кратко охарактеризуем каждый выделенных из типов.

Слабо поляризованный тип имеет общую сырьевую направленность экономики, для которой «сжатость» развития и, соответственно, – поляризация весьма характерны. Однако дисперсию здесь могут обеспечивать значительные инвестиции, позволяющие «рассредоточивать» экономическую активность и привлекать население на разрабатываемые месторождения. Это и привело к включению в данный тип Магаданской и Сахалинской областей, в которых создаётся весьма значительный ВРП и невелика численность населения, что, вместе с высоким уровнем доходов, положительно сказывается на социальном развитии (например, Сахалинская область по коэффициенту младенческой смертности занимает 3е место в стране, имея один из самых низких показателей). Таким образом, пространственное развитие в этом типе приобретает хоть и поляризованный, но не жёстко-сконцентрированный характер и формируются хоть и небольшие, но центры развития помимо региональных столиц.

Средне поляризованный тип имеет уже большее число регионов, притом весьма отличных между собой. Однако их объединяют негативные последствия постсоветской социально-экономической трансформации и уже меньший, чем в первом типе, уровень инвестиций. Это объективно усиливает «вязкость» пространства и его поляризацию, в результате чего резко усиливаются факторы конкурентоспособности, число которых для дальневосточных регионов невелико. Соответственно, кроме региональных столиц, формируется лишь несколько субцентров социально-экономического развития, что, безусловно, несколько балансирует пространственную структуру, но не меняет её поляризационного тренда.

Высоко поляризованный тип также весьма разнороден. И если под влиянием «эффекта низкой базы» Чукотский АО демонстрирует едва ли не лучшие рассматриваемые социально-экономические показатели, то Республика Бурятия – с точностью наоборот. Однако объединяет все четыре региона типа значительная «укоренённость» факторов поляризации, усиливших конкурентные преимущества весьма ограниченного числа локалитетов. На это же неизбежно накладывается негативная демографическая ситуация. В результате регионополис всё более усиливается, а пространство, соответственно – поляризуется.

Максимально-поляризованный тип, включающий два региона, фактически представляет собой специфическую дальневосточную форму мегарегиона со сверхконцентрацией населения и экономики в региональном центре. Здесь постсоветские тенденции не только усилили пространственное сжатие, но и существенно повысили значение регионополиса, ставшего

самоподдерживаемой системой, сосредоточившей фактически все возможные реализуемые конкурентные преимущества своих территорий.

В целом необходимо отметить, что под влиянием трендов социально-экономического развития и продуцируемых им проблем, постсоветский период стал для Дальнего Востока периодом усиления пространственной поляризации, характерной для всех регионов, однако в силу влияния различных факторов дифференцированной на 4 выделенных типа.

Заключение

Пространственная поляризация столь характерная для постсоветской истории России характерна и для Дальнего Востока, где приобрела определённую устойчивость и региональную специфику. Это обусловило выделение четырёх отмеченных типов, имеющих значительные отличия друг от друга. Важно отметить – эти различия в первую очередь не количественные, а качественные. Это требует специфического подхода к ним в контексте региональной политики, которая потенциально может несколько нивелировать эти различия и сгладить остроту проблем. Также имеются значительные перспективы дальнейшего исследования пространственной поляризации данной территории.

Литература

1. Дмитриев, Р.В. Эволюционные процессы в системах центральных мест: 1.6.13: диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук: защищена 20.05.2022; утверждена 28.10.2022 / Дмитриев Руслан Васильевич. – Москва, 2022. – 223 с. – Текст непосредственный.
2. Шупер, В.А. Территориальная организация населения и хозяйства России на пороге тектонических сдвигов / В.А. Шупер. – Текст: непосредственный // Вопросы географии. Сб. 141: Проблемы регионального развития России. – Москва: Издательский дом «Кодекс», 2016. – С. 529-538.
3. Трейвиш, А.И. Сжатие социального геопространства: между реальностью и утопией / А.И. Трейвиш. – Текст: непосредственный // Демоскоп Weekly. – 2012. – № 507-508. – С. 1-27.
4. Безруков, Л.А. Экстерриториальность крупного капитала как фактор межрегиональной поляризации российского пространства (на примере Сибири) / Л.А. Безруков. – Текст: непосредственный // Поляризация российского пространства: экономико-, социально- и культурно-географические аспекты: Материалы XXXIV ежегодной сессии эг. секции Международной академии регионального развития и сотрудничества МАРС, 2018. – С. 32-49.
5. Регионы России. Основные социально-экономические показатели городов: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13206>.
6. Смирнягин, Л.В. Мегарегионы как новая форма территориальной организации общества / Л.В. Смирнягин. Текст : непосредственный // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2011. – № 1. – С. 9-15.
7. Кузин, В.Ю. Региополизация в Дальневосточном федеральном округе: некоторые аспекты / В.Ю. Кузин. – Текст: электронный // Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле». – 2022. – № 2(26). – С. 47-54.
8. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2022. – М.: Росстат, 2022. – 1122 с.

References

1. Dmitriev, R.V. Jevoljucionnye processy v sistemah central'nyh mest: 1.6.13: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora geograficheskikh nauk: zashhishhena 20.05.2022; utverzhdena 28.10.2022 / Dmitriev Ruslan Vasil'evich. – Moskva, 2022. – 223 s. – Tekst neposredstvennyj.
2. Shuper, V.A. Territorial'naja organizacija naselenija i hozjajstva Rossii na poroge tektonicheskikh sdvigov / V.A. Shuper. – Tekst: neposredstvennyj // Voprosy geografii. Sb. 141: Problemy regional'nogo razvitija Rossii. – Moskva: Izdatel'skij dom «Kodeks», 2016. – S. 529-538.
3. Trejvish, A.I. Szhatie social'nogo geoprostranstva: mezhdz real'nost'ju i utopiej / A.I. Trejvish. – Tekst: neposredstvennyj // Demoskop Weekly. – 2012. – № 507-508. – S. 1-27.
4. Bezrukov, L.A. Jeksterritorial'nost' krupnogo kapitala kak faktor mezhregional'noj poljarizacii rossijskogo prostranstva (na primere Sibiri) / L.A. Bezrukov. – Tekst: neposredstvennyj // Poljarizacija rossijskogo

prostranstva: jekonomiko-, social'no- i kul'turno-geograficheskie aspekty: Materialy XXXIV ezhegodnoj sessii jeg. sekcii Mezhdunarodnoj akademii regional'nogo razvitija i sotrudnichestva MARS, 2018. – S. 32-49.

5. Regiony Rossii. Osnovnye social'no-jekonomicheskie pokazateli gorodov: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13206>.

6. Smirnjagin, L.V. Megaregiony kak novaja forma territorial'noj organizacii obshhestva / L.V. Smirnjagin. Tekst: neposredstvennyj // Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5. Geografija. – 2011. – № 1. – S. 9-15.

7. Kuzin, V.Ju. Regionopolizacija v Dal'nevostochnom federal'nom okruge: nekotorye aspekty / V.Ju. Kuzin. – Tekst: jelektronnyj // Vestnik SVFU. Serija «Nauki o Zemle». – 2022. – № 2(26). – S. 47-54.

8. Regiony Rossii. Social'no-jekonomicheskie pokazateli. 2022. – M.: Rosstat, 2022. – 1122 s.

Сведения об авторах

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

Е. С. Малых, А. И. Сметанина

Вятский государственный университет, г. Киров, Россия

e-mail: stud126782@vyatsu.ru

e-mail: ai_kuznetsova@vyatsu.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОГО ТУРИЗМА В КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. Научно-популярный туризм – это новое направление через осмысление теоретической концепции в российском и мировом туризме на пересечении науки и туризма. Актуальность исследования – научно-популярный туризм и его направления находят отражение в теоретических и прикладных публикациях отечественных и зарубежных авторов. Обзор отечественной и зарубежной литературы позволяет с точностью сказать об отсутствии разработанности концепции «научно-популярного туризма» не только в России, но и во всем мире [1]. Это новое направление туризма будет вносить вклад в экономику региона, создаст позитивный экономический и социальный эффекты. В России запущена Программа молодежного и студенческого туризма, благодаря которой молодые люди смогут путешествовать по регионам России с целью профессионального развития, стажировок на производствах, а также участия в научных мероприятиях и написания научных работ. Уже с малых лет школьники могут посещать производственные предприятия (мероприятия, экскурсии, выставки и многое другое), внося свой вклад в науку новыми проектами и идеями. В условиях нестабильности международных процессов, экономического кризиса, закрытия границ в 2020 году, связанного с пандемией, более актуальным стал вопрос, какие направления туризма необходимо развивать, и какой новый продукт может предложить бизнес. Кировская область обладает высоким туристским потенциалом и большим количеством познавательных ресурсов для организации научно-популярного туризма на ее территории. В статье рассматриваются роль научно-популярного туризма, его влияние на экономику региона и перспективы развития как нового направления в российском туризме, которому до настоящего времени практически не уделялось достаточного внимания. Научно-популярный туризм помогает молодым ученым решать вопрос финансирования научных экспедиций. Польза от такого симбиоза науки и путешествий в том, что ученый получает доступ к объекту своих исследований, а турист – неповторимый научный взгляд на мир, доступ в самые интересные места планеты и удовлетворение от своего личного вклада в науку.

Ключевые слова: научно-популярный туризм, Кировская область, регион, туристский потенциал, роль научно-популярного туризма, привлекательность, перспективные направления.

E. S. Malykh, A. I. Smetanina

Vyatka State University, Kirov, Russia

e-mail: stud126782@vyatsu.ru

e-mail: ai_kuznetsova@vyatsu.ru

THE DEVELOPMENT PROSPECTS OF POPULAR SCIENCE TOURISM IN KIROV OBLAST

Abstract. Popular science tourism is a new direction through the understanding of the theoretical concept in Russian and world tourism at the intersection of science and tourism. The relevance of the research: popular science tourism and its directions are reflected in theoretical and applied publications of domestic and foreign authors. A review of Russian and foreign literature allows us to say with accuracy about the lack of elaboration of the concept of “popular science tourism” not only in Russia, but also around the world [1]. This new direction of tourism will contribute to the economy of the region, will create positive economic and social effects. A program of youth and student tourism has been launched in Russia, thanks to which young people will be able to travel around the regions of Russia for the purpose of professional development, internships at production facilities,

as well as participation in scientific events and writing scientific papers. From an early age, schoolchildren can visit industrial enterprises (events, excursions, exhibitions and much more), contributing to science with new projects and ideas. Given the instability of international processes, the economic crisis, and the closure of borders in 2020 associated with the pandemic, the question of which tourism destinations need to be developed and what new product business can offer has become more urgent. The Kirov region has a high tourist potential and a large number of educational resources for the organization of popular science tourism on its territory. The article examines the role of popular science tourism, its impact on the regional economy and the development prospects as a new direction in Russian tourism, which has not received sufficient attention until now. Popular science tourism helps young scientists to solve the issue of financing scientific expeditions. The benefit of such a symbiosis of science and travel is that a scientist gets access to the object of his research, and a tourist gets a unique scientific view of the world, access to the most interesting places on the planet and satisfaction from his personal contribution to science.

Keywords: popular science tourism, Kirov region, region, tourism potential, the role of popular science tourism, attractiveness, perspective directions.

Введение

Научно-популярный туризм – это временные выезды (путешествия) граждан РФ с постоянного места жительства в познавательных, профессионально-деловых и иных целях, которые происходят по заранее утвержденным маршрутам с посещением инфраструктуры организаций, сопряженных с научной, инновационной, образовательной просветительской деятельностью [2].

Новизна научно-популярного туризма выражается в его отличительной особенности, которая может включать посещение образовательных, научных и иных профессиональных учреждений, лабораторий, обсерваторий, встречи с российскими учеными и специалистами, для студентов проводится в форме выездных стажировок и практик, исследования археологических объектов, памятников культурного и исторического наследия, растительного и животного мира и прочего.

Целью исследования является выявление перспектив развития научно-популярного туризма в Кировской области.

Для достижения цели необходимо установить следующие задачи:

- 1) Проанализировать особенности для развития научно-популярного туризма в Кировской области;
- 2) Выявить основные ресурсы для развития научно-популярного туризма в Кировской области.

Метод анализа и синтеза – позволит собрать воедино важную информацию об изучаемом регионе из информационных источников.

Результаты исследования

Принимая во внимание огромный научно-образовательный и туристский потенциал России, можно сделать вывод о необходимости, помимо уже реализуемых программ и проектов, интенсивно развивать и научно – популярный туризм как отдельное направление на пересечении туристского бизнеса и науки. Задачами научно – популярного туризма являются самообразование и личное развитие через познание окружающего мира, привлечение молодого поколения к профессиям и знаниям. Научно-популярный туризм может помочь с финансированием экспедиций и важных исследований. Польза заключается в том, что участник экспедиции получает полный доступ к самым уникальным местам нашей страны. Главная цель – это выявить что-то новое, обнаружить то, что раньше было неизвестно, сделать открытия. В научно-популярном туризме могут принимать участие люди абсолютно разных профессий: ученые, фотографы, художники. Все это позволяет посмотреть на мир разными взглядами.

Привлекательность территории для развития научно-популярного туризма зависит от ее историко-культурного и природного потенциала, вклада в науку. Кировская область представ-

ляет собой оригинальный научный центр, имеющий необходимые предпосылки для развития внутреннего туризма. На территории области работает 130 крупных промышленных предприятий. На данный момент притяжением научно-популярного туризма в Кировской области можно выделить Детский космический центр им. В.П. Савиных в городе Киров, который оснащен экспозиционными, выставочными и интерактивными залами с высокотехнологичным оборудованием и роботами [3]. В нем ежедневно проводятся экскурсии, а также различные образовательные программы («Космическое макетирование», «Занимательная астрономия»).

Кроме этого, можно выделить Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б.М.Житкова». Более 25 лет Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б.М. Житкова успешно занимается организацией охотничьих и рыболовных туров по всему миру. Кроме работ, выполняемых в рамках Государственного задания, институт выполняет научно-исследовательские работы и оказывает услуги по договорам и грантам с зарубежными и отечественными заказчиками [4].

В Кировской области настоящее время продолжается развитие созданного в 2019 году биотехнологического и иммунобиологического научно-образовательного центра мирового уровня «Биополис», целью которого является достижение лидерства в иммунобиологии как одного из самых перспективных направлений развития мировой науки в интересах обеспечения эпидемиологической безопасности страны и создание точки инновационного роста национальной экономики [5].

Еще одной туристской локацией является биомедицинский комплекс «Нанолек». Здесь можно увидеть много необычных аппаратов, которые помогают тестировать препараты. В частности, роботизированная система «Янус» сама выполняет анализ – открывает емкость с веществом, проводит реакцию и считывание результатов. А другая система «Сотекс» демонстрирует имитацию того, как таблетка проходит через организм человека [6].

Затрагивая уникальные природные места, нельзя не сказать про государственный заповедник «Нургуш» [7]. Состоит из двух участков. Нургуш – в Котельничском районе – занимается охраной пойменных лесов. Тушалор – в Нагорском районе. леса. Для посетителей заповедной территории организовано несколько экотроп:

1. «В поисках тайны»,
2. «Тропа Йети»,
3. «Здравствуй, бобр»,
4. «Заячья поляна».

На этих маршрутах есть возможность поближе увидеть обитателей заповедника, таких как бобры, скопа, енотовидная собака, выхухоль и др. Здесь же есть естественнонаучный музей. Среди его экспонатов – предметы из различных пород дерева, лекарственные травы, старинные рыболовные снасти.

Одним из уникальных государственных памятников природы является Котельничское местонахождение парейазавров. Расположено в городе Котельнич. Ученые уже несколько десятков лет находят сохранившиеся скелеты животных, обитавших 260 млн лет назад, в городе Котельнич, на берегу реки Вятка [8].

Научно-популярная активность – это важный шаг в сторону сохранения природного и культурного наследия, повышения интереса к научной деятельности. Возрождение научного направления в туризме началось относительно недавно, появлению этого тренда также способствовал рост интереса к экологической повестке и развитие экотуризма, а также повышение экологической культуры участников экспедиций. Приведенные выше объекты научно-популярного туризма можно включать в туристские маршруты, где цель каждой экспедиции найти, выявить, узнать что-то новое, обнаружить те взаимосвязи, которые ранее были не очевидны.

Научно-популярный тур может включать в себя и экологическую, и историко-культурную составляющую, главное – активное участие человека в процессе, а не просто получение им интересной информации и созерцание объектов, что характерно для обычных познавательных экскурсий.

Заключение

К перспективным направлениям развития научно-популярного туризма можно отнести путешествия в формате научных экспедиций, целью которых является не только рекреация и получение новых знаний, но и проведение практических исследований полезных ископаемых и других природных ресурсов, увеличение практической и интерактивной составляющей в экскурсионных маршрутах, а также разработка этих маршрутов и усовершенствование новейшими технологиями, которые будут привлекать молодое поколение. Для организации научно-популярного туризма в Кировской области есть и развитая система исследований в самых широких областях, и множество разнообразных природных, ландшафтных и биосферных заповедных зон, промышленных предприятий. Научно-популярный туризм может оказать помощь в финансировании экспедиций и важных исследований.

Литература

1. Крылова, Е. А. Перегрузка мирового туризма: научный туризм / Е. А. Крылова // Власть и общество. – 2021. – № 2(22). – С. 4-10. – DOI 10.32743/2658-4077.2021.2.22.427. – EDN MBXUIB. (Дата обращения 18.03.23)
2. «Концепция развития научно-популярного туризма в Российской Федерации на период до 2035 года» (утв. Минобрнауки России 25.01.2023 N ВФ/1-Кн). <https://prodod.moscow/wp-content/uploads/Kontseptsiya-razvitiya-nauchno-populyarnogo-turizma-v-Rossii.pdf>
3. Детский космический центр город Киров. URL: <https://dkc43.ru/> (Дата обращения 18.03.23)
4. ВНИИОЗ // Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б.М. Житкова». URL: <http://vnioz-kirov.ru/> (Дата обращения 18.03.23)
5. Научно-культурный потенциал // Правительство Кировской области. URL: <https://www.kirovreg.ru/passport/1.php> (Дата обращения 18.03.23)
6. Защищаем жизнь и здоровье людей // Нанолек. <https://nanolek.ru/ru/>
7. Заповедник «Нургуш» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации ФГБУ «Государственный заповедник «Нургуш»». URL: <https://nurgush.org/> (Дата обращения 18.03.23)
8. Под Кировом разработали туристический маршрут по местам обитания парейазавров // ТАСС. URL: <https://tass.ru/v-strane/4742308> (Дата обращения 18.03.23)
9. Издательство Креативная экономика // Научно-популярный туризм как новое туристическое направление в экономике России. URL: <https://creativeconomy.ru/lib/114638> (Дата обращения 18.03.23)

References

1. Krylova, E. A. Perezagruzka mirovogo turizma: nauchnyj turizm / E. A. Krylova // Vlast' i obshhestvo. – 2021. – № 2(22). – S. 4-10. – DOI 10.32743/2658-4077.2021.2.22.427. – EDN MBXUIB. (Data obrashhenija 18.03.23)
2. «Konceptcija razvitiya nauchno-populjarnogo turizma v Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda» (utv. Minobrnauki Rossii 25.01.2023 N VF/1-Kn). <https://prodod.moscow/wp-content/uploads/Kontseptsiya-razvitiya-nauchno-populyarnogo-turizma-v-Rossii.pdf>
3. Detskij kosmicheskij centr gorod Kirov. URL: <https://dkc43.ru/> (Data obrashhenija 18.03.23)
4. VNIIOZ // Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe nauchnoe uchrezhdenie «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut ohotnich'ego hozjajstva i zverovodstva imeni professora B.M. Zhitkova». URL: <http://vnioz-kirov.ru/> (Data obrashhenija 18.03.23)

5. Nauchno-kul'turnyj potencial // Pravitel'stvo Kirovskoj oblasti. URL: <https://www.kirovreg.ru/passport/1.php> (Data obrashhenija 18.03.23)
6. Zashhishhaem zhizn' i zdorov'e ljudej// Nanolek. <https://nanolek.ru/ru/>
7. Zapovednik «Nurgush» // Ministerstvo prirodnyh resursov i jekologii Rossijskoj Federacii FGBU «Gosudarstvennyj zapovednik «Nurgush»». URL: <https://nurgush.org/> (Data obrashhenija 18.03.23)
8. Pod Kirovom razrabotali turisticheskij marshrut po mestam obitanija parejazavrov // TASS. URL: <https://tass.ru/v-strane/4742308> (Data obrashhenija 18.03.23)
9. Izdatel'stvo Kreativnaja jekonomika // Nauchno-populjarnyj turizm kak novoe turisticheskoe napravlenie v jekonomike Rossii. URL: <https://creativeconomy.ru/lib/114638> (Data obrashhenija 18.03.23)
10. Krylova, E. A. Reset of world tourism: scientific tourism / E. A. Krylova // Power and society. – 2021. – № 2(22). – Pp. 4-10. – DOI 10.32743/2658-4077.2021.2.22.427. – EDN MBXUIB. (Accessed 18.03.23)
11. «The concept of the development of popular science tourism in the Russian Federation for the period up to 2035» (approved by the Ministry of Education and Science of Russia 25.01.2023 N VF/1-Kn). <https://prodod.moscow/wp-content/uploads/Kontseptsiya-razvitiya-nauchno-populyarnogo-turizma-v-Rossii.pdf>
12. Children's Space Center Kirov city. URL: <https://dkc43.ru/> (Accessed 18.03.23)
13. VNIIOZ // Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute of Hunting and Animal Husbandry named after Professor B.M. Zhitkov». URL: <http://vniioz-kirov.ru/> (Accessed 18.03.23)
14. Scientific and cultural potential // Government of the Kirov region. URL: <https://www.kirovreg.ru/passport/1.php> (Accessed 18.03.23)
15. Protecting the life and health of people// Nanolek. <https://nanolek.ru/ru/>
16. Nurgush Nature Reserve // Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation Federal State Budgetary Institution «Nurgush State Reserve». URL: <https://nurgush.org/> (Accessed 18.03.23)
17. Near Kirov, a tourist route was developed to the habitats of pareiasaurs // TASS. URL: <https://tass.ru/v-strane/4742308> (Accessed 18.03.23)
18. Creative Economy Publishing House // Popular Science tourism as a new tourist destination in the Russian economy. URL: <https://creativeconomy.ru/lib/114638> (Accessed 18.03.23)

Сведения об авторах

МАЛЫХ Елизавета Сергеевна – студент группы ТРБ-3601-01-00, Вятский государственный университет, e-mail: stud126782@vyatsu.ru

MALYKH Elizabeth Sergeevna – 3rd year student of the direction “Tourism”, Vyatka State University, e-mail: stud126782@vyatsu.ru

СМЕТАНИНА Алёна Игоревна – к.э.н., доцент кафедры ТиУП, Вятский государственный университет, e-mail: ai_kuznetsova@vyatsu.ru

SMETANINA Alyona Igorevna – Senior Lecturer, Department of Tourism and Personnel Management, Vyatka State University, e-mail: ai_kuznetsova@vyatsu.ru

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	Технологии 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 «Юбилей» 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 нумеруются.

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 юбилей 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 40х50 мм и не более 120х170 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, каб. 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(30) 2023

Технический редактор *А.Н. Егорова*
Компьютерная верстка *Л.М. Винокурова*
Оформление обложки *П.И. Антипин*

Подписано в печать 19.06.2023. Формат 70х108/16.
Дата выхода в свет 19.06.23.