

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»

№ 1(25) 2022

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор

А.Н. Николаев, д. б. н.

Заместитель главного редактора, редактор серии

Ю.Г. Данилов, к.г.н., проф.

Выпускающий редактор

В.Ю. Кузин, к.г.н.

Члены редакционной коллегии:

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

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

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

Тел./факс: (4112) 32-16-79

Северо-Восточный федеральный университет

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

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

Network scientific periodical

Published since 2016

The frequency of publication is 4 times a year

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

№ 1(25) 2022

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Editor-in-Chief

A.N. Nikovaev, Doctor of Biological Sciences

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

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

Commissioning Editor

V. Yu. Kuzin, Candidate of Geographic Sciences

Members of the Editorial Board of the Series:

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ

<i>В.И. Шпикерман, Е.В. Шпикерман. Встреча на Колыме: к открытию золотоносности хребта Черского.....</i>	<i>5</i>
--	----------

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

<i>А.А. Ковров. О путях повышения точности результатов мобильного лазерного сканирования</i>	<i>10</i>
--	-----------

КАРТОГРАФИЯ И ГИС

<i>А.Н. Горохов. Картографирование антропогенной трансформации ландшафтов в Якутии</i>	<i>19</i>
<i>С.С. Нехин, Н.М. Бабашкин. Лазерное сканирование и перспективы его применения для целей топографического картографирования и кадастра.....</i>	<i>29</i>
<i>Я.Б. Легостаева, А.И. Журавлев, В.Ф. Попов, О.В. Шадринова, Д.С. Ноев. Инвентаризация нарушенных геологоразведочными работами земель Западной Якутии по данным дистанционного зондирования.....</i>	<i>40</i>

ГЕОКРИОЛОГИЯ

<i>Н.А. Федоров, Н.И. Башарин. Активизация термокарста после лесных пожаров на Янском плоскогорье на примере района г. Верхоянска</i>	<i>46</i>
---	-----------

ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТА

<i>А.В. Остроухов, Г.В. Харитонова. Влияние пожаров на состав донных отложений рек и озёр урбанизированных территорий Среднеамурской низменности.....</i>	<i>58</i>
---	-----------

CONTENT

GEOCOLOGY

<i>V.I. Shpikerman, E.V. Shpikerman.</i> Meeting on Kolyma: towards the discovery of the gold content of the Chersky Ridge	5
--	---

APPLIED RESEARCH

<i>A.A. Kovrov.</i> About the ways to improve the accuracy of mobile laser scanning results	10
---	----

CARTOGRAPHY & GIS

<i>A.N. Gorokhov.</i> Mapping of anthropogenic transformation of landscapes in Yakutia	19
<i>S.S. Nekhin, N.M. Babashkin.</i> Laser scanning and prospects of its application for the purposes of topographic mapping and cadastre	29
<i>Ya.B. Legostaeva, A.I. Zhuravlev, V.F. Popov, O.V. Shadrinova, D.S. Noev.</i> Inventory of the lands of Western Yakutia disturbed by geological exploration according to remote sensing data	40

GEOCRIOLOGY

<i>N.A. Fedorov, N.I. Basharin.</i> Activation of thermokarst after forest fires on the Yansky plateau: tha case of Verkhoyansk area	46
--	----

LANDSCAPE AND LANDSCAPE GEOCHEMISTRY

<i>A.V. Ostroukhov, G.V. Kharitonova.</i> The effect of wildfires on the composition of bottom sediments of rivers and lakes in urbanized areas of the Middle Amur lowland	58
--	----

— ГЕОЛОГИЯ —

УДК 55(09)+553.41(571.56+571.65)+910.4(571.56+571.65)

DOI 10.25587/SVFU.2022.25.1.008

*В.И. Шпикерман, Е.В. Шпикерман*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург, Россия**ВСТРЕЧА НА КОЛЫМЕ:
К ОТКРЫТИЮ ЗОЛОТОНОСНОСТИ ХРЕБТА ЧЕРСКОГО**

Аннотация. Одним из выдающихся результатов Индигирской (1926 г.) и Колымской (1929-1930 гг.) экспедиций Сергея Владимировича Обручева был прогноз наличия в Колымо-Индигирском междуречье Северо-Востока России обширного золотоносного пояса, служившего впоследствии «главным валютным цехом» страны. Определяющую роль в этом открытии, по мнению авторов, сыграла встреча С.В. Обручева с Ю.А. Билибиным. Встреча состоялась на берегу р. Колымы в июле 1929 г. Основой прогноза послужила информация о региональной золотоносности большей части хребта Черского, полученная в обеих экспедициях С.В. Обручева (1926 и 1929 гг.), и сделанные экспедицией Ю.А. Билибина (1928-1929 гг.) открытия промышленных россыпей золота на небольшом участке юго-восточного окончания хребта.

Ключевые слова: экспедиции С.В. Обручева по р. Индигирка (1926 г.) и по р. Колыма и её притокам (1929-1930 гг.), Колымская экспедиция Ю.А. Билибина (1928-1929 гг.), шлиховое опробование, прогноз Главного Колымо-Индигирского золотоносного пояса, хребет Черского, Северо-Восток России.

V.I. Shpikerman, E.V. Shpikerman

A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

**MEETING ON KOLYMA:
TOWARDS THE DISCOVERY OF THE GOLD CONTENT
OF THE CHERSKY RIDGE**

Abstract. One of the outstanding results of the Indigirka (1926) and Kolyma (1929-1930) expeditions of Sergei Vladimirovich Obruchev was the forecast of the presence of an extensive gold-bearing belt in the Kolyma-Indigirka interfluvial area of the Russian northeast, which later served as the “main foreign currency producing shop” of the country. According to the authors, the decisive role in this discovery was played by the meeting of Obruchev with Yuri Bilibin. The meeting took place on the bank of the Kolyma River in July 1929. The forecast was based on information about the regional gold content of most of the Chersky Ridge, obtained in both Obruchev’s expeditions (1926 and 1929), and the discoveries of industrial gold placers made by the Bilibin’s expedition (1928-1929) in a small area of the southeastern end of the Ridge.

Keywords: S.V. Obruchev’s expeditions along the Indigirka River (1926) and along the Kolyma River and its tributaries (1929-1930), Yu.A. Bilibin’s Kolyma expedition (1928-1929), schlich sampling, forecast of the Main Kolyma-Indigirka gold-bearing belt, Chersky Ridge, Russian northeast.

ШПИКЕРМАН Владимир Иосифович – д.г.н., г.н.с., Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ФГБУ ВСЕГЕИ). E-mail: Vladimir_Shpikerman@vsegei.ru

SHPIKERMANN Vladimir Iosifovich – Doctor of Geographical Sciences, Chief Researcher, Russian Geological Research Institute (FGBU “VSEGEI”). E-mail: Vladimir_Shpikerman@vsegei.ru

ШПИКЕРМАН Евгений Владимирович – вед. инженер, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ФГБУ ВСЕГЕИ). E-mail: Evgeny_Shpikerman@vsegei.ru

SHPIKERMANN Evgeny Vladimirovich – Leading Engineer, Russian Geological Research Institute (FGBU “VSEGEI”). E-mail: Evgeny_Shpikerman@vsegei.ru

Введение

28 сентября 2021 г. в Якутске, в Северо-Восточном федеральном университете имени М.К. Амосова состоялась научно-практическая конференция «Колыма соединяет регионы», посвященная 130-летию со дня рождения выдающегося ученого-геолога, географа, члена-корреспондента АН СССР Сергея Владимировича Обручева и 90-летию его экспедиции по реке Колыма и ее притокам в 1929-30 годах. Двумя годами ранее в Большом зале Штаб-квартиры Русского географического общества в Санкт-Петербурге прошла конференция, посвященная Индигирской экспедиции С.В. Обручева в 1926 году и презентации нового издания его книги об этой экспедиции «В неведомых горах Якутии».

С двумя восточно-якутскими экспедициями С.В. Обручева связано несколько открытий. Самое известное – это вычисление полюса холода в Оймяконе. Не менее известное – открытие хребта Черского, целой горной страны, ставшей, наверное, последним крупным географическим открытием на территории СССР, а может быть, и всей Евразии. Третье (известное только небольшому кругу географов) – впервые точно нанесено русло Колымы на карту. Однако было еще одно важное открытие, которое кардинально повлияло на судьбу и развитие целого региона, но от которого С.В. Обручев остался, как бы в тени другого имени. Это открытие одной из крупнейших в мире золотоносных провинций в бассейнах рек Колымы и Индигирки.

Основная часть

В 1926 году С.В. Обручев возглавил организованную Геологическим комитетом экспедицию в восточную часть Якутии. В его задачи входило пересечение Верхоянского хребта с запада на восток, изучение предполагаемого месторождения платины на ручье Чибгалах и пересечение Верхоянского хребта в обратном направлении в другом месте. Из-за различных организационных неурядиц экспедиция стартовала с большой задержкой. В соответствии с существовавшей тогда картой и описаниями предполагалось, что, перевалив через Верхоянский хребет, экспедиция достигнет конечной точки практически по равнинной местности. Однако вместо этого на их пути встали высокие скалистые цепи обширной горной системы. Так был открыт новый хребет (точнее система хребтов), который географическое общество СССР назвало хребтом Черского [1]. Стало ясно, что орография бассейнов Индигирки, Колымы и Омолона значительно отличается от существовавших тогда представлений, и эти районы необходимо изучать. Во время экспедиции проводились, в том числе, и геологические исследования вновь открытой горной системы. На Индигирке и её притоках отбирались шлиховые пробы, в которых были найдены знаки золота. Это были первые кирпичики в основание будущего крупного открытия. Поиски платины на Чибгалахе удалось провести только в начале сентября. Платина на этом ручье так и не была найдена, сообщение о ней оказалось ложным. В Якутск С.В. Обручев вернулся уже зимой.

Повод и возможности для дальнейшего изучения хребта Черского нашлись довольно быстро. В 1925-30 гг. проходила комплексная Якутская экспедиция Академии наук СССР по изучению территории Якутской АССР в самых разных аспектах: и географических, и гуманитарных. В 1929 году С.В. Обручев возглавил геоморфологический отряд этой экспедиции. На этот раз в задачу экспедиции входило изучение бассейна Колымы (в те годы бассейн Колымы почти целиком располагался на территории Якутской АССР). Для этого решено было из Оймякона (бассейн р. Индигирки) перевалить в верховья Колымы и сплавиться до её нижнего течения.

В это время на Колыме уже происходили важные геологические исследования. В 1926 году стали появляться сведения о россыпном золоте в верховьях Колымы на реке Среднекан, для проверки сведений о котором в 1928 году Геолком на деньги треста «Союззолото» отправил молодого геолога Юрия Билибина. Золото на Среднекане было впервые найдено еще в 1914 году, но политические катаклизмы, случившиеся в России, отложили процесс старательского проникновения туда на десяток лет. К лету 1929 года район геологических исследований Ю. Билибина простирался вдоль Колымы в междуречье Среднекана и Утинки.

По плану дойти до устья реки Таскан (левый приток Колымы) отряд С.В. Обручева собирался еще по снегу, затем построить лодку и не спеша сплавиться по реке. Однако, как и за три года до этого, сроки начала работы экспедиции сдвинулись на более позднее время, и до устья Таскана экспедиция добиралась сначала по уже вскрывшемуся истоку Колымы р. Аян-Юрях,

затем по самой Колыме. Другой отряд экспедиции двигался выючным караваном севернее по рекам Берелёх-Мылга-Таскан. Благодаря задержке, стало возможным проводить шлиховое опробование на Колыме и её притоках. В пределах хребта Тас-Кыстабыт, начиная от Оймякона, в шлиховых пробах не было обнаружено знаков золота. Положительные результаты появились на северном маршруте, начиная с р. Берелех, на южном маршруте – от р. Оротук. Большая часть проб, отобранных на этих участках обоих маршрутов, давала знаки золота, иногда обильные. Обручеву было очевидно, что экспедиция вновь пересекает горы хребта Черского. В геологическом отношении эти горы были тем же, что он видел на Индигирке: те же граниты среди песчаников триаса. Ручьи и реки, размывающие эти граниты и песчаники, «золотили» еще больше, чем это было на Индигирке.

Нами сопоставлены точки находок в экспедициях С.В. Обручева шлихового золота в речных наносах обоих бассейнов с известными в настоящее время контурами золотоносных поясов и зон центральных районов Северо-Востока России (рис. 1). Совершенно очевидно, что в 1926 и в 1929 годах была установлена принципиальная золотоносность будущего Главного золотоносного пояса Колымо-Индигирского междуречья, служившего многие годы крупнейшим валютным цехом нашей страны.

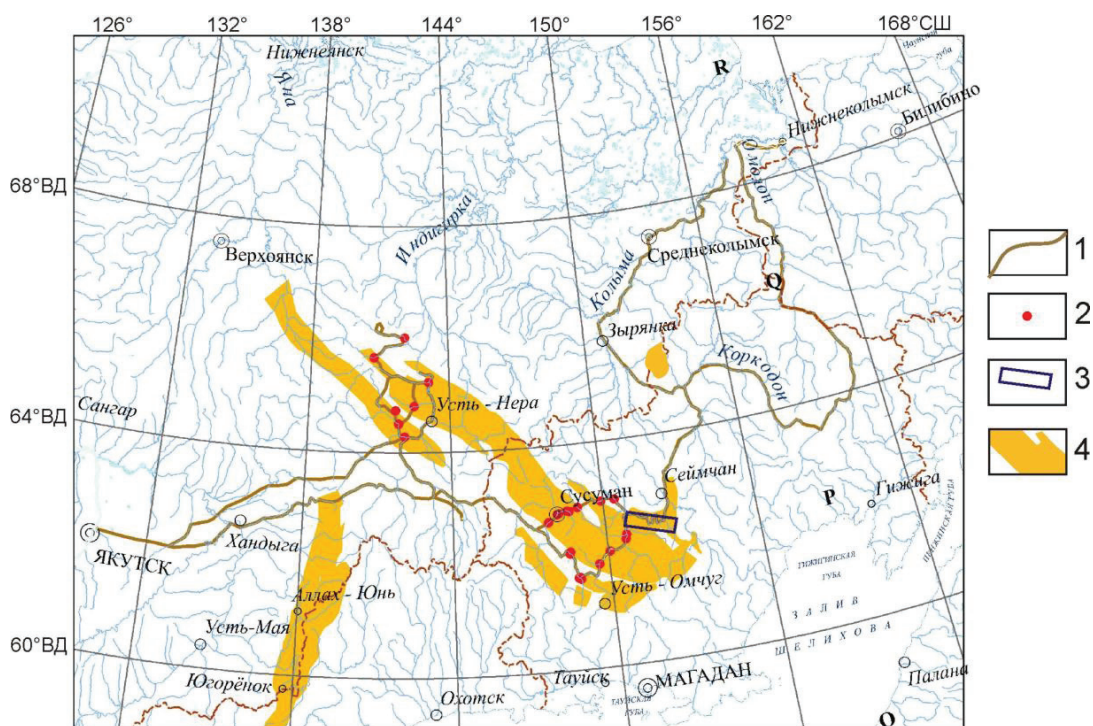


Рис. 1. Маршруты экспедиций С.В. Обручева 1926, 1929-30 годов и золотоносность бассейнов рек Алдан, Индигирка, Колыма. 1 – линии маршрутов экспедиций С.В. Обручева; 2 – точки обнаружения золота в шлиховых пробах экспедиций С.В. Обручева; 3- район работ экспедиции Ю.А. Билибина 1928-29 годов; 4 – современные контуры золотоносных поясов и зон Северо-Востока России

28 июля 1929 года Сергей Обручев встретил отряд Юрия Билибина. На рис. 2 – хорошо известная фотография «Билибин в шлепанцах», автором которой является С.В. Обручев, сделанная во время этой встречи. Вот как сам Сергей Владимирович описывает её в своей книге «В неизведанные края»: «На второй день пути после Таскана по правому берегу реки (Колымы) в устье небольшой речки внезапно показалась палатка. Высадившись на берег, я вхожу в нее и вижу человека с большой бородой, сидящего на земле, поджав по-турецки ноги в широких черных шлепанцах. В нем очень трудно узнать геолога Ю. Билибина, которого я видел до этого в Ленинграде в городской одежде и тщательно выбранным» [2, С. 126].

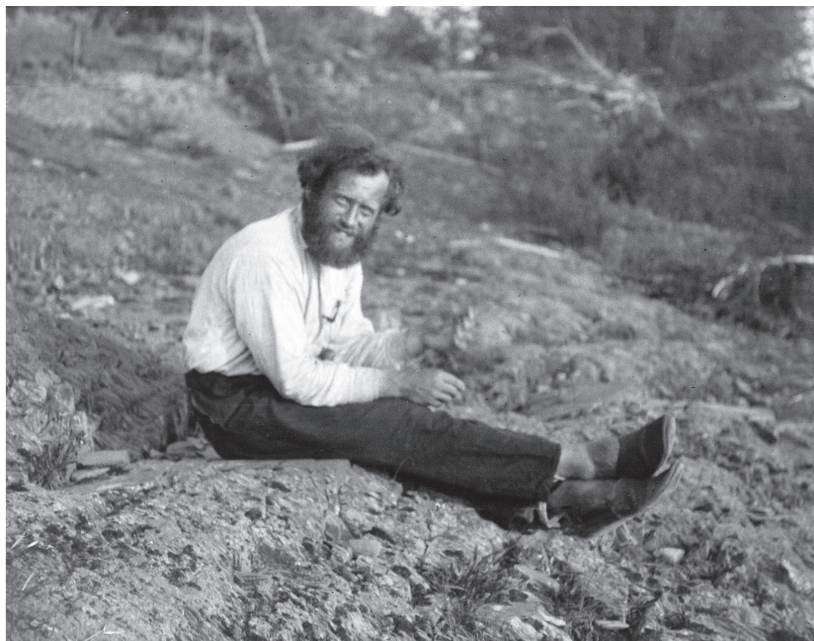


Рис. 2. Ю.А. Билибин, р. Колыма, июль 1929 г.
(фото С.В. Обручева, из фотоархива Т.С. Обручевой)

Больше об этой встрече сведений не сохранилось. В полевых дневниках С.В. Обручева о ней нет вообще никаких упоминаний, а личные дневники были, видимо, уничтожены в 1937 году, когда по Институту Арктики, где тогда работал С.В. Обручев, проходила волна репрессий. Дневников Ю. А. Билибина за этот период тоже не сохранилось.

Нам доподлинно неизвестно, о чём беседовали два маститых геолога при встрече на Колыме. Несомненно, говорили они, прежде всего, о геологии, делились своими наблюдениями и открытиями. Иначе и быть не могло. Юрий Александрович Билибин с коллегами работал на известном золотоносном участке, где уже несколько лет мыли золото старатели Союззолота. Партия Билибина открыла на этом участке новые богатые россыпи золота. Однако это был совсем небольшой участок на самом окончании хребта Черского (рис. 1). В пределах этого участка едва размещался всего один небольшой гранитный массив. При всем таланте геолога, Ю. Билибин, тем не менее, на тот момент не располагал необходимой информацией, необходимым объёмом геологических данных, позволяющих дать обширный региональный прогноз золотоносности территории. С.В. Обручев к тому времени уже изучил геологию хребта Черского в нескольких пересечениях этой горной системы как на севере (по Индигирке), так и на юге (по Колыме и её притокам). И везде эта структура, «нашпигованная» гранитными массивами, содержала в речных наносах самородное золото. Обручев, несомненно, поделился своими наблюдениями и мыслями с Билибиным. С учётом весьма успешной разведки золота, проведенной партией Билибина, у них, скорее всего, и родилась совместная идея о золотоносности всего хребта Черского.

Позднее в рукописном отчёте «Геолого-поисковые работы в бассейне р. Колыма (Краткий очерк) за 1929-1930 годы» С.В. Обручев писал: «Во время моей экспедиции 1926 года на р. Индигирку разведочной партией экспедиции под начальством инженера В. Протопопова были установлены признаки золота в косах рек, текущих из нескольких гранитных массивов левого берега. Массивы эти лежат в пределах хребта Черского, который Индигирка, подобно Колыме пересекает в своем верхнем течении. Строение хребта Черского в индигирском пересечении совершенно аналогично описанному для Колымы: смятая в складки песчано-сланцевая свита триаса с многочисленными интрузиями гранита. Микроскопическое исследование показало полное однообразие этих гранитов, как массивов, обнаруживающих признаки

золотоносности, так и других. Это биотитовые, редко двуслюдистые или мусковитные граниты, часто порфириовидные. Макроскопически они совершенно похожи на граниты Колымы. <...> Опираясь на полное однообразие строения хребта и состава гранитов, можно заключить о возможной золотоносности на всем протяжении хребта. Но, т.к. признаки золота, обнаруженные нами на Индигирке, были немногочисленны, то пока следует признать наиболее благоприятным юго-восточный конец хребта.» <...> Длина золотоносной части хребта Черского от 700 до 800 км, ширина колеблется от 150 до 250 км., так что подлежащая геолого-поисковым исследованиям площадь достигает 150.000 км²»¹.

Заключение

В некоторых интернет-изданиях, посвященных колымской экспедиции С.В. Обручева 1929-1930 гг., пишут, что эта экспедиция подтвердила прогноз Ю. Билибина о существовании в бассейне Колымы золотоносной зоны (<https://kolyma.ru/index.php?newsid=87776>). По нашему мнению, эти утверждения следует существенно уточнить. Магаданский историк Александр Козлов приводит сведения о том, что в начале сентября 1929 г. С.В. Обручев из пос. Среднеколымск оперативно информировал по телеграфу руководителя Якутской комиссии АН СССР в Ленинграде и руководство Союззолота в Москве о следующем: «обнаружена золотоносность в ряде притоков Колымы. По этим данным можно говорить об общей золотоносности всего Средне-Черского нагорья между Индигиркой и Колымским хребтом длиной 700 и шириной 200 километров» (<https://www.kolyma.ru/magadan/index.php?newsid=93>). Это был великолепный прогноз, совпавший в главном с прогнозом руководителя Колымской геологоразведочной экспедиции 1928 – 1929 г.г. Ю. А. Билибина. Однако Билибин дал свои первые устные сообщения о результатах работы в представительствах Союззолота во Владивостоке и Иркутске только в октябре-ноябре 1929 г., а затем председателю правления этого общества в Москве. То есть сообщение С. В. Обручева поступило, как минимум, на полтора месяца раньше. Но тогда, в начале сентября 1929 г., на телеграммы Обручева, по-видимому, мало кто обратил внимание. Ю.А. Билибин был более настойчив в продвижении своего прогноза. Приоритет этого открытия официально сейчас полностью признается за Ю.А. Билибиным. Авторы уверены, что ключевую роль в формировании идеи золотоносности хребта Черского сыграла июльская 1929 г. встреча С.В. Обручева и Ю.А. Билибина на Колыме. **Приоритет в прогнозе Главного Колымо-Индигирского золотоносного пояса должен быть в равной степени разделён между этими двумя выдающимися исследователями северо-восточной окраины Азии.** Считаем, что это крупнейшее и очень важное для нашего государства открытие С.В. Обручева должно быть известно широкой общественности и достойно оценено.

Литература

1. Обручев С.В. В неведомых горах Якутии. – М-Л: Государственное изд-во, 1928. – 247 с.
2. Обручев С.В. В неизведанные края. – М.:Изд-во «Мысль», 1975. – 366 с.

References

1. Obruchev S.V. V nevedomyh gorah Yakutii. – M-L: Gosudarstvennoe izd-vo, 1928. – 247 s.
2. Obruchev S.V. V neizvedannye kraia. – M.:Izd-vo «Mysl'», 1975. – 366 s.

¹ (СПФ АРАН, ф.966, оп.1, ед. хр. 117)

— ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ —

УДК 528.7+528.8

DOI 10.25587/SVFU.2022.25.1.009

А.А. Ковров

ФГБУ "Центр геодезии, картографии и ИПД", г. Москва, Россия

О ПУТЯХ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Аннотация. В настоящее время технология мобильного лазерного сканирования все чаще используется при выполнении крупномасштабной топографической съемки автодорог и прилегающих к ним территорий и при обследовании дорожного полотна. Достоинства технологии мобильного лазерного сканирования – оперативность и точность получаемых результатов. В статье рассмотрены основные источники погрешностей, возникающих при съемке с использованием мобильных сканирующих систем. Проанализированы имеющиеся и предложены новые способы повышения точности результатов мобильного лазерного сканирования, а также приведена методика оценки их точности. На основе анализа показателей точности съемки с использованием мобильных сканирующих систем сделан вывод о возможности их применения для выполнения крупномасштабной топографической съемки автодорог и прилегающей территории. Установлено, что основным источником погрешностей является аппаратура глобальной навигационной спутниковой системы (далее – ГНСС), с использованием которой вычисляется траектория мобильного сканера. Показаны способы, с использованием которых возможно повысить точность съемки в условиях слабого или отсутствующего сигнала ГНСС. Рассмотрены вопросы оценки точности результатов мобильного лазерного сканирования. Показано, что если выставочные параметры компонентов мобильной системы сканирования были тщательно откалиброваны, то основным источником ошибок будет связан с работой навигационного блока и лидаров.

В частности, при полной или частичной потере сигнала ГНСС, а также при значительной величине эффекта многопутности, точность определения положения и ориентации мобильной платформы будет снижаться.

Ключевые слова: мобильное лазерное сканирование, инерциальная навигационная система, глобальная спутниковая навигационная система, топографическая съемка, облако точек, лидар.

A.A. Kovrov

Center of Geodesy, Cartography and SDI, Moscow, Russia

ABOUT THE WAYS TO IMPROVE THE ACCURACY OF MOBILE LASER SCANNING RESULTS

Abstract. Currently, mobile laser scanning technology is increasingly used in large-scale topographic surveys of roads and adjacent areas and in the inspection of the roadway. The advantages of mobile laser scanning technology are the efficiency and accuracy of the results obtained. The article considers the main sources of errors that occur when shooting with the use of mobile scanning systems. The existing and proposed new ways to improve the accuracy of the results of mobile laser scanning are analyzed, as well as a technique for assessing their accuracy. Based on the analysis of survey accuracy indicators using mobile scanning systems, it was concluded that they can be used to perform large-scale topographic surveys of roads and the surrounding area. It was established that the main source of errors is the equipment of the global navigation satellite system (hereinafter referred to as GNSS), which is used to calculate the trajectory of a mobile scanner. Methods are shown by which it is possible to improve

КОВРОВ Александр Александрович – н.с., ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД». E-mail: kovrov_aa@nsdi.rosreestr.ru

KOVROV Aleksander Aleksandrovich – Researcher, Center of Geodesy, Cartography and SDI. E-mail: kovrov_aa@nsdi.rosreestr.ru

the accuracy of shooting in conditions of a weak or absent GNSS signal. The issues of evaluating the accuracy of the results of mobile laser scanning are considered. It is shown that if the exhibition parameters of the components of the mobile scanning system were carefully calibrated, then the main source of errors will be associated with the operation of the navigation unit and lidars.

In particular, with a complete or partial loss of the GNSS signal, as well as with a significant multipath effect, the accuracy of determining the position and orientation of the mobile platform will decrease.

Keywords: mobile laser scanning, inertial navigation system, global navigation satellite system, topographic survey, point cloud, lidar.

Введение

Мобильное лазерное сканирование (далее – МЛС) – это одна из современных технологий сбора геопространственных данных, которая на протяжении многих лет успешно используется в нашей стране и за рубежом для съемки автомобильных и железных дорог, а также для инвентаризации дорожной инфраструктуры. Основными преимуществами данной технологии является ее высокая точность и оперативность получения данных – всего за один рабочий день можно отсканировать несколько десятков и более километров автомобильных и железных дорог и получить исчерпывающую и точную информацию о них в виде точечной модели высокого разрешения.

Согласно ГОСТ 32869-2014 лазерное сканирование можно использовать при выполнении топографической съемки автодорог наряду с традиционными способами [1]. При этом заявленная заводами – изготовителями точность получаемой модели в виде облака точек лежит в пределах 5 сантиметров для большинства систем геодезического класса, чего вполне достаточно для топографической съемки крупных масштабов. Однако такая точность может быть получена не всегда. В частности, в условиях плотной городской застройки или въезде сканирующей системы в тоннели, сигналы глобальной навигационной спутниковой системы, позволяющей вычислить траекторию мобильного сканера, становятся недостаточными либо вовсе пропадают. В этом случае точность съемки быстро ухудшается, до нескольких дециметров и более, что делает результаты сканирования непригодными для составления топографических планов крупных масштабов [2]. Для решения возникающих проблем с потерей точности были предложены различные методы. Например, для повышения точности внешнего ориентирования сканов при съемке городских кварталов предлагалось проводить видеофиксацию реперных точек, координаты которых получены независимым способом [2]. Для съемки в тоннелях и внутренних помещений зданий, когда сигналы ГНСС вовсе отсутствуют, разработана технология SLAM (англ. – Simultaneous Localization And Mapping) [3], которая позволяет выполнять геопривязку сканов по характерным точкам. Однако у технологии SLAM есть принципиальный недостаток, который потенциально может препятствовать ее использованию в крупных дорожных проектах – это отсутствие контроля точности с использованием независимых высокоточных измерений. Также при съемке с применением МЛС присутствуют проблемы при съемке участков поворотов дороги [4].

В статье проанализированы существующие методики повышения точности результатов сканирования и предложены новые способы, такие как использование наземного статического лазерного сканирования для съемки поворотов дороги и использование реперных точек с известными координатами в тоннелях для привязки данных мобильного лазерного сканирования. Предложенные способы основаны на использовании независимых измерений с использованием традиционных технологий, что обеспечит дополнительный контроль и повысит точность уравненных данных лазерного сканирования.

Источники погрешностей мобильной сканирующей системы

По сравнению с тахеометрической съемкой и спутниковой съемкой в реальном времени (RTK – Real Time Kinematic), мобильное сканирование (далее – МЛС) отличается большей оперативностью и независимостью точности измерений от человеческого фактора – все полевые измерения максимально автоматизированы. Для съемки протяженных участков автодорог и городских кварталов данная технология представляется наиболее предпочтительной.

Для получения наиболее точных и достоверных результатов съемки необходимо проанализировать все источники погрешностей, влияющих на окончательные результаты мобильного лазерного сканирования.

Погрешность измерений с применением мобильной сканирующей системы можно разделить на две основные категории: 1) погрешность, связанная с качеством траекторной привязки мобильной платформы, и 2) инструментальную точность работы системы, качество привязки облака точек к опорным точкам (реперным объектам), качество уравнивания отдельных проходов сканирования между собой. Под уравниванием проходов понимается совмещение точек лазерного сканирования, полученных мобильной сканирующей системой, проехавшей по одному и тому же маршруту (туда и обратно), как правило во встречных направлениях.

Погрешности первой группы связаны с качеством ГНСС измерений, выполненных на базовых станциях, работающих непрерывно в течение всего сеанса съемки, и с качеством ГНСС измерений, полученных роверным приемником, входящим в состав навигационного модуля сканирующей системы. Также на погрешности первой группы оказывают влияние ошибки: а) работы инерциальной измерительной системы, б) внешние условия окружающей среды, в) качество нахождения оптимальной траектории движения носителя сканера (строгость математического решения, заложенного в программном обеспечении), г) перемещение носителя с той или иной скоростью и характер поверхности, по которой он перемещается, д) ошибка определения элементов редукции сканирующей системы относительно спутниковой аппаратуры и инерциальной системы [5]. На ошибки группы а) – в) пользователь МЛС повлиять не может. Ошибки, получаемые в ходе спутниковых наблюдений хорошо известны и описаны в различной литературе [6-7]. Присутствие данного рода ошибок приводит к несовпадению траекторий движения мобильной платформы, полученным в разные циклы измерений и как следствие – несовпадению между собой облаков точек. Для уменьшения ошибок, получаемых в ходе спутниковых наблюдений применяются различные приемы. В частности, необходимо: а) заблаговременно рассчитывать благоприятную ГНСС – обстановку, б) обеспечивать наличие базовых станций на протяжении всего маршрута съемки, в) проводить анализ результатов сразу после съемочных работ с определением участков с плохим траекторным решением и пропуском данных ГНСС.

Ошибки группы д), а именно определение элементов редукции сканирующей системы выполняется самими исполнителями полевых работ либо на заводе-изготовителе.

При анализе второй категории ошибок, которые иногда в литературе называются относительными [5] необходимо учесть, что результаты измерений, получаемых с помощью МЛС, имеют более низкую точность в сравнении с традиционной тахеометрией и RTK. Ошибка определения точки лазерного отражения увеличивается с удалением от траектории движения мобильного сканера. Таким образом, максимальная точность (та, что обычно бывает заявлена производителем) достигается при сканировании в непосредственной близости от прибора, например, дорожного полотна. Чем дальше рассматриваемый участок отстоит от дороги, тем ниже точность, с которой определяется пространственное положение точки. Причем это правило одинаково верно, как для лидаров импульсного, так и фазового типа. Например, для сканера АГМ-МС7 [8] абсолютная погрешность определения координат точек лазерных отражений составляет 3 см в плане и 3 см по высоте (на удалении 50 м от траектории), несмотря на то что погрешность измерения расстояния фазовым лидаром PENTAX S2100, входящим в систему АГМ-МС7, составляет 3,1 мм. На удалении 119 м (максимальная дальность для сканера АГМ-МС7) погрешность определения координат точек лазерных отражений не превысит 5 – 7 см. Таким образом, абсолютная погрешность получения координат точек лимитируется точностью навигационного блока. Однако, такой точности достаточно для построения топографических планов 1:500 и 1:1000, так как согласно инструкции [9] средние погрешности съемки составляют $\frac{1}{4}$ от принятой высоты сечения рельефа (минимальная высота сечения рельефа составляет 0,5 м для масштабов 1:500 и 1:1000), а предельно допустимые погрешности измерений для данных масштабов составляет $0.25 * 0.5 = 0.125$ м. Таким образом, система АГМ-МС7 позволяет выполнять топографическую съемку автодорог с зоной отвода до 100 м. При использовании мобильных сканеров с большим радиусом действия, например RIEGL VMX-450, ошибка

определения координат пикетов также будет расти с увеличением расстояния от траектории мобильной платформы, и при расстоянии в 300 м (дальность измерения лидаром RIEGL VMX-450) превысит нормативную точность топосъемки. Следовательно, необходимо использовать специальные приемы, повышающие точность конечных результатов сканирования.

Существующие способы повышения точности МЛС и их анализ

Г.А. Шануровым [2] был предложен способ повышения точности МЛС при съемке в городских кварталах, суть которой заключается в видеофиксации легко различимых реперных точек, которые совмещаются с облаками точек на этапе уравнивания. Видеофиксация обычно проводится параллельно с мобильным сканированием. На этапе предварительной обработки результатов съемки фиксируют плановые координаты легко опознаваемых на видеокадрах, и по возможности удаленных от трассы движения МЛС реперных точек. Такими точками могут быть углы зданий, столбы, специально установленные на этапе рекогносцировки трассы, вехи. Реперные точки не координируют ни одним из традиционных способов. Далее оператор вводит в программу обработки команду «зафиксировать координаты реперных точек и использовать значения этих координат как неизменные».

Оказалось, что СКП координат точек лазерных отражений, определенных с использованием предложенного метода в основном на один сантиметр превышают СКП этих же точек, определенных с использованием способа с твердыми точками. Однако у способа, предложенного Г.А. Шануровым, есть один принципиальный недостаток, заключающийся в том, что его затруднительно использовать на участках открытых автострад, за пределами городской застройки, где практически отсутствуют дома, углы и крыши которых можно было бы использовать для выделения реперных точек. В этом случае представляется целесообразным применение твердых, закрепленных на местности и легко различимых опорных точек, координаты которых получают с использованием РТК. Важно при этом, чтобы твердые точки располагались как вдоль самой дороги, так и на участках за пределами дорожного полотна, что обеспечит дополнительный контроль при уравнивании траектории мобильной платформы.

Важным фактором, влияющим на точность съемки дороги, является количество лазерных сканеров, установленных на мобильной платформе, а также их взаимное расположение. Также точность съемки зависит от типа сканирующей системы и в определенной степени – от используемых алгоритмов обработки данных, которые реализованы в программном обеспечении. Относительно выбора типа лазерных сканеров достаточно сказать, что импульсные сканеры обеспечивают сантиметровый уровень точности измерений в пределах границ дорожного полотна, чего вполне достаточно для выполнения большинства съемочных работ. Для выявления мелких дефектов поверхности целесообразно применение фазовых сканеров, что совместно с применением эффективных алгоритмов фильтрации и уравнивания позволит получить максимальную точность модели дорожного полотна.

При установке сканера перпендикулярно траектории движения мобильной платформы, расстояние между точками в профиле сканирования будет существенно больше расстояния между самими профилями, которое будет еще больше при увеличении скорости движения мобильной сканирующей системы. Поэтому чаще всего на мобильной платформе устанавливают два сканера, расположенные под углом друг к другу, что с одной стороны дает облако точек в виде равномерной сетки, а с другой позволяет покрыть измерениями автодорогу и прилегающие объекты с минимальным числом мертвых зон, см. рис. 1 [10].

Таким образом, выбор места расположения системы МЛС на мобильной платформе, а также траектория движения самой платформы влияют на информативность облаков точек. Чем выше расположена система, тем меньше образуется теневых участков на откосах и за барьерным ограждением.

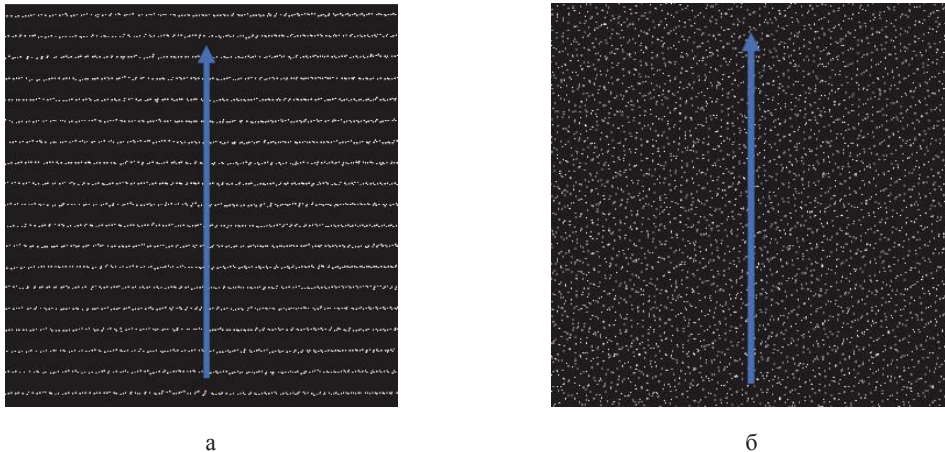


Рис. 1. Облако точек лазерного сканирования: а – при одном сканере, установленном перпендикулярно траектории движения; б – при двух сканерах, установленных под углом друг к другу

Данные мобильного лазерного сканирования используются не только для выполнения топографической съемки автодорог, но и для создания цифровой модели дорожного полотна (ЦМП). Фактором, влияющим на качество создаваемой ЦМП, является снижение точности результатов сканирования на участках с резкими поворотами дороги. В статье [4] рассматривается влияние предварительной обработки данных МЛС на точность построения цифровых моделей поверхности дорог. Как показала практика, в местах разворотов наблюдается резкое падение точности, и поэтому, как предполагают авторы статьи, единственным решением повышения точности построения цифровой модели поверхности дорожного покрытия на участках с разворотами является удаление им принадлежащих точек лазерных отражений.

Предложение по повышению точности МЛС при сканировании поворотов дороги

Для устранения эффекта падения точности, помимо удаления точек лазерных отражений можно предложить другой способ: использование наземного статического лазерного сканирования. В этом случае, не удаляя данные МЛС на участках резких поворотов, дополнительно выполняется сканирование наземным статическим сканером на этих участках, с последующим объединением облаков точек в единый точечный массив данных. При этом координирование сканов, полученных статическим способом, необходимо выполнить с использованием оборудования ГНСС, по маркам или путем ориентации сканера на известный объект. В этом случае, в дополнение к опорным точкам, располагаемым вдоль трассы, появится дополнительный контроль точности по независимым измерениям, полученным наземным статическим лазерным сканированием, инструментальная точность которого выше точности мобильных лидаров. Вообще, описанный прием вполне может быть применим и на контрольных, прямых участках трассы, где отсутствуют вертикально расположенные объекты, такие как дома, что является одним из факторов снижения точности.

Предложение по повышению точности МЛС при частичной или полной потере сигнала ГНСС

Как известно, при выполнении МЛС на застроенных территориях, а также при заезде системы в тоннель, сигналы ГНСС полностью или частично пропадают. При отсутствии сигналов ГНСС в течение 1 минуты точность определения пространственного положения точек облака упадет до дециметровой. В этой связи, актуальной становится задача уравнивания траектории по опорным точкам, координаты которых известны из независимых измерений. Традиционно, для внешнего ориентирования сканов при съемке линейных объектов используют координированные реперные марки, устанавливаемые с интервалом около 50 метров. Однако такая технология является достаточно трудоемкой в плане проведения полевых работ. Можно уменьшить число необходимых реперных точек и повысить точность съемки в условиях слабого сигнала ГНСС, если «принудительно» совмещать точки облака, ближайшие к распознаваемым в облаке реперным объектам. Суть возможной методики заключается в следующем. После выполнения

сканирования рассчитывается траектория МЛС обычным способом. Получаем облако точек, в котором каждая точка облака (пикет в обычном определении) имеет метку времени ГНСС. Затем отыскиваем реперные марки по облаку точек и выделяем их центры. Центры реперных марок могут совпасть, но могут и не совпасть с каким-либо пикетом. Координаты реперных марок должны быть получены заблаговременно с использованием спутниковой съемки или тахеометрии, если съемка ведется в тоннеле. После чего на облаке точек отыскиваем пикет, имеющий наиболее близкую к центру реперной точки метку времени. Формируем невязки, т.е. расхождения между этими двумя точками. С учетом полученных невязок выполняем переуравнивание траектории. После уравнивания центры марок должны практически совпадать по координатам с традиционной съемкой. Таким образом, при плохом или отсутствующем сигнале ГНСС возможно повысить точность уравнивания сканов и уменьшить количество реперных марок.

Предложение по оценке точности данных МЛС

В заключение рассмотрим возможную методику оценки точности измерений, получаемых с использованием системы МЛС, которая позволит независимо от установленных предприятием – изготовителем паспортных значений характеристик сканирующей системы, определить погрешности измерений в плане и по высоте.

Для реализации методики необходимо вдоль маршрута движения сканирующей системы в поле зрения сканеров определить четко видимые цели, которые должны быть расположены как в непосредственной близости от трассы, так и на максимальном удалении от нее, при котором возможна регистрация отраженных импульсов. В качестве целей можно использовать как вехи, дорожные знаки, так и углы зданий, углы кровли или какие-либо хорошо различимые на сканах объекты. Все выбранные цели координируются с использованием спутникового метода RTK с высокой точностью, которые принимаются в качестве исходных. После чего результаты, полученные мобильным лазерным сканированием, сравниваются с исходными. Процедура будет включать следующие три шага: Первоначально данные ГНСС и инерциальной системы совместно обрабатываются для получения траектории мобильной платформы (например, в ПО POSPac Mobile Mapping Suite Applanix). Получают «сырые» данные лазерного сканирования. На втором шаге данные по траектории мобильного сканера объединяются с «сырыми» данными сканирования и получают облако точек в координатах WGS-84 (например, в программах Optech LMS Pro или RIEGL RiPROCESS). На третьем шаге по облаку точек выделяют целевые объекты и сравнивают их координаты с координатами этих же объектов, полученных независимым способом с использованием RTK.

Погрешности определения координат целей, полученных с применением МЛС можно определить по формулам:

$$\sigma_x = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_r)^2}{n}}$$

$$\sigma_y = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_p - y_r)^2}{n}}$$

$$\sigma_h = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_p - h_r)^2}{n}}$$

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (1)$$

где x_p, z_p, h_p – координаты целей, полученных по облаку точек, x_r, z_r, h_r – координаты тех же точек, полученных методом RTK, σ_h – точность по высоте, σ_p – точность в плане, n – общее число целевых объектов.

Однако метод оценки точности данных МЛС только по контрольным точкам, координированным с использованием RTK недостаточно точен по причине частого несоответствия одиночных контрольных точек и пикетов облака точек лазерного сканирования. По этой причине более эффективным методом оценки точности материалов МЛС станет их сравнение с данными статического наземного сканирования, выполненного для тестовых участков, включающих проезды сканирующей системы. Данные статического наземного сканирования имеют большую точность и полноту в сравнении с МЛС, и также как традиционная съемка не коррелируют с данными мобильного сканирования.

Для выполнения оценки данных МЛС можно использовать хорошо известный метод наименьших квадратов. Суть возможной методики оценки точности заключается в следующем.

Рассмотрим основное уравнение, определяющее положение пикета $r_p^m(t)$ в момент времени t в некоторой глобальной системе координат (m):

$$r_p^m(t) = r_b^m(t) + R_b^m(t) \{ a_{IMU/s}^b + R_s^b r_p^s(t) \} \quad (2)$$

где $r_b^m(t)$ – начало системы координат инерциальной системы (b), $R_b^m(t)$ – матрица поворота от системы координат (m) к системе координат (b), $a_{IMU/s}^b$ – вектор смещения начала координат системы сканера (s) от начала координат (b), R_s^b – матрица разворота от системы координат сканера к системе координат инерциальной системы, r_p^s – положение пикета в системе координат сканера.

Координаты пикета p , определяемые в уравнении (2) имеют различные погрешности. Если выставочные параметры компонентов мобильной системы сканирования были тщательно откалиброваны, то основной источник ошибок будет связан с работой навигационного блока и лидаров. В частности, при полной или частичной потере сигнала ГНСС, а также при значительной величине эффекта многопутности, имеющего место в городских кварталах, точность определения положения и ориентации мобильной платформы будет снижаться. В этой связи перспективным методом оценки точности результатов мобильного лазерного сканирования может оказаться сравнение данных, полученных мобильным сканером с данными, полученными статическим наземным сканированием, то есть без использования навигационного блока. Как известно, данные мобильного лазерного сканирования не одинаковы по точности в пределах одной съемочной миссии по причине различных условий ГНСС – наблюдений – сигнал может быть сильнее или слабее. Также точность зависит от того, насколько инерциальная система эффективно рассчитывает положение и ориентацию мобильной платформы. В мобильных системах картографического класса используются дешевые инерциальные модули MEMS, которые не способны в течение продолжительно времени отсутствия сигнала ГНСС поддерживать требуемый уровень точности. Напротив, в системах геодезического класса используются инерциальные системы максимальной точности, что позволяет в течение первых минут отсутствия ГНСС – сигнала сохранять высокую точность съемки.

Данные по статическому наземному сканированию равнозначны, так как при данном виде сканирования не используется навигационный блок. Поэтому нахождение расхождений в облаках точек, полученных статическим и мобильным методами, позволит судить о величине погрешностей в данных мобильного лазерного сканирования.

Для выполнения сравнения статического и мобильного сканирования можно использовать различные итеративные процедуры, известные из вычислительной математики. Одной из таких процедур является итеративный алгоритм поиска ближайшей точки (ICP – iterative closest point) созданный в 1992 году для определения пространственного положения произвольной трехмерной формы. Результатом работы алгоритма является вычисление шести параметров преобразования Гельмерта (три параметра положения и три – поворота), которые будут использованы

для оценки точности результатов мобильного сканирования. Масштабный коэффициент при этом не используется в расчете, так как в мобильном лазерном сканировании он всегда равен единице.

Перед выполнением уравнивания по методу наименьших квадратов облако точек МЛС разделяется на небольшие блоки, соответствующие малому интервалу лазерного сканирования. Эти отдельные блоки последовательно уравниваются с облаком точек статического сканирования. Математическая связь между точками МЛС блока k и соответствующими точками облака статического сканирования следует из соотношения:

$$\mathbf{r}^{TLS} = \mathbf{R}_k \mathbf{r}^{MLS} + \mathbf{t}_k \quad (3)$$

где $\mathbf{r}^{TLS}$ – массив данных статического сканирования, $\mathbf{r}^{MLS}$ – массив данных мобильного сканирования, $\mathbf{R}_k$ – матрица разворота между двумя облаками точек, $\mathbf{t}_k$ – вектор смещения. Тогда по методу наименьших квадратов из решения системы уравнений (3) получим невязки:

$$\varepsilon^2 = \|\mathbf{R}_k \mathbf{r}^{MLS} + \mathbf{t}_k - \mathbf{r}^{TLS}\|^2 \quad (4)$$

Заключение

В процессе исследований проанализированы существующие способы повышения точности съемки с применением мобильной сканирующей системы. Показано, что заявленная производителями мобильных сканирующих систем геодезического класса точность позволяет выполнять с их использованием топографическую съемку автомобильных дорог в случае наличия достаточного сигнала ГНСС. Рассмотрены и проанализированы существующие способы повышения точности данных, полученных с использованием МЛС, и предложены новые. Показано, что использование независимых результатов измерений с использованием традиционных методов для повышения точности мобильного лазерного сканирования на данный момент является необходимым условием при производстве топографической съемки автодорог, особенно на участках с недостаточным покрытием ГНСС.

Предложена методика оценки точности результатов лазерного сканирования с использованием целевых объектов.

Литература

1. ГОСТ 32869-2014 // (режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200118889>) дата обращения: 02.11.2021.
2. Шануров Г.А. Способ обработки результатов топографической съемки, выполненной с использованием мобильного сканирующего комплекса / Шануров Г.А., Половнев О.В., Манилова А.Д. // Известия вузов, Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 3. – С. 42-47.
3. Fransson J. Increasing the accuracy of positioning in mobile mapping systems, a method supported by simultaneous localization and mapping. // Report 6B, 2017, NTNU // (режим доступа: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2459948>) дата обращения: 01.11.2021.
4. Алтынцев М.А. Влияние результатов предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования на точность построения цифровых моделей поверхности автодорог / М.А. Алтынцев, Х.М. Сабер // Интерэкспо Гео-сибирь. – 2020. – № 1. – С. 74-85.
5. Дулин С.К. Точность геопространственных данных железнодорожной инфраструктуры, полученных методом мобильного лазерного сканирования / Дулин С.К., Якушев Д.А. // Наука и технологии железных дорог, сетевое издание. – 2017. – № 4. – С. 54-62.
6. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2. Монография. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с.
7. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. – М.: Картгеоцентр, 2004. – 355 с.
8. Система мобильного сканирования АГМ-МС7 (2021) // (режим доступа: <https://www.agmsys.ru/mscan/ms7-2100>) дата обращения: 12.10.2021.

9. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500 / Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. – М.: Недра, 1982. – 160 с.

10. Кузнецов А.О. Современные системы мобильного лазерного сканирования и особенности их применения на автомобильных дорогах (2019) // (режим доступа: <https://dorndi.org.ua/files/upload/Дороги и мосты № 42 с 56-76.pdf>) дата обращения: 02.11.2021.

11. Paul J. Besl A method for registration of 3-D shapes, 1992 // (режим доступа: http://graphics.stanford.edu/courses/cs164-09-spring/Handouts/paper_icp.pdf) дата обращения: 24.11.2021.

References

1. GOST 32869-2014 // (rezhim dostupa: <https://docs.cntd.ru/document/1200118889>) data obrashcheniya: 02.11.2021.

2. SHanurov G.A. Sposob obrabotki rezul'tatov topograficheskoy s"emki, vypolnennoj s ispol'zovaniem mobil'nogo skaniruyushchego kompleksa / SHanurov G.A., Polovnev O.V., Manilova A.D. // Izvestiya vuzov, Geodeziya i aerofotos"emka. – 2016. – № 3. – С. 42-47.

3. Fransson J. Increasing the accuracy of positioning in mobile mapping systems, a method supported by simultaneous localization and mapping. // Report 6B, 2017, NTNU // (rezhim dostupa: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2459948>) data obrashcheniya: 01.11.2021.

4. Altynceev M.A. Vliyanie rezul'tatov predvaritel'noj obrabotki dannyh mobil'nogo lazernogo skanirovaniya na tochnost' postroeniya cifrovyyh modelej poverhnosti avtodorog / M.A. Altynceev, H.M. Saber // Interekspo Geosibir'. – 2020. – № 1. – С. 74-85.

5. Dulin S.K. Tochnost' geoprostranstvennyh dannyh zheleznodorozhnoy infrastruktury, poluchennyh metodom mobil'nogo lazernogo skanirovaniya / Dulin S.K., YAKushev D.A. // Nauka i tekhnologii zheleznyyh dorog, setevoye izdanie. – 2017. – № 4. – С. 54-62.

6. Antonovich K.M. Ispol'zovanie sputnikovyyh radionavigacionnyh sistem v geodezii. V 2 t. T. 2. Monografiya. – M.: FGUP «Kartgeocentr», 2006. – 360 s.

7. Genike A.A., Pobedinskij G.G. Global'nye sputnikovyye sistemy opredeleniya mestopolozheniya i ih primeneniye v geodezii. – M.: Kartgeocentr, 2004. – 355 s.

8. Sistema mobil'nogo skanirovaniya AGM-MS7 (2021) // (rezhim dostupa: <https://www.agmsys.ru/mscan/ms7-2100>) data obrashcheniya: 12.10.2021.

9. Instrukciya po topograficheskoy s"emke v masshtabah 1:5000, 1:2000, 1:1000 i 1:500 / Glavnoye upravleniye geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR. – M.: Nedra, 1982. – 160 s.

10. Kuznecov A.O. Sovremennyye sistemy mobil'nogo lazernogo skanirovaniya i osobennosti ih primeneniya na avtomobil'nyh dorogah (2019) // (rezhim dostupa: <https://dorndi.org.ua/files/upload/Dorogi i mosty № 42 с 56-76.pdf>) data obrashcheniya: 02.11.2021.

11. Paul J. Besl A method for registration of 3-D shapes, 1992 // (rezhim dostupa: http://graphics.stanford.edu/courses/cs164-09-spring/Handouts/paper_icp.pdf) data obrashcheniya: 24.11.2021.

— КАРТОГРАФИЯ И ГИС —

УДК 911.52:502/504

DOI 10.25587/SVFU.2022.25.1.010

А.Н. Горохов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Россия

**КАРТОГРАФИРОВАНИЕ АНТРОПОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ
ЛАНДШАФТОВ В ЯКУТИИ**

Аннотация. Рассмотрены методологические принципы оценки и картографирования степени антропогенной измененности ландшафтов. Приведен анализ современного состояния ландшафтов Южной Якутии на основе структурной организации и экологического состояния природных комплексов разного уровня. Изучена ландшафтная структура Южной Якутии, установлены основные черты их дифференциации. Оценка степени антропогенного воздействия осуществляется на основных уровнях эколого-географического анализа Якутии: региональном, локально-региональном и локальном. На региональном уровне выявляется степень антропогенной нарушенности ландшафтных региональных комплексов. Здесь приводятся данные об изменениях выделенных объектов исследования на уровне региональных комплексов. На локально-региональном уровне определяется степень антропогенной трансформации типологических комплексов в пределах определенного физико-географического района. Нарушенность ландшафтов определяется по соотношению суммы площадей нарушенных ландшафтов с их весовыми коэффициентами к площади природных ландшафтов. На локальном уровне определяется степень антропогенной измененности ландшафтов, выражаемая в процентах. Выделяется пять степеней нарушенности ландшафтов: неизменные, слабоизмененные, существенно измененные, сильно измененные и преобразованные ландшафты. Предлагаемая методика оценки нарушенности природных ландшафтов была использована на примере следующих объектов исследования в Южной Якутии: на региональном уровне рассматривается территория Алдано-Тимптонского междуречья (масштаб 1:500 000), локально-региональном – территория Нерюнгринского промышленного комплекса (масштаб 1:200 000), локальном – месторождение «Элькон» (масштаб 1:25 000). На основе результатов оценки антропогенной измененности и с помощью ГИС-технологий были составлены карты степени антропогенной преобразованности ландшафтов Южной Якутии. Анализ антропогенного воздействия на разных пространственно-иерархических уровнях ландшафтов позволил выявить степень нарушенности их естественного состояния.

Ключевые слова: ландшафт, трансформация ландшафтов, уровень исследования, нарушенность ландшафта, степень преобразованности ландшафтов.

A.N. Gorokhov

Institute of Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

**MAPPING OF ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION
OF LANDSCAPES IN YAKUTIA**

Abstract. Some methodological principles of assessment and mapping of the degree of anthropogenic change in landscapes are considered. The analysis of modern condition of landscapes of South Yakutia on the basis of the structural organization and the environmental state of natural complexes of different level. The landscape structure of Southern Yakutia is studied, the basic features of their differentiation are established. Assessment of the degree of anthropogenic impact is carried out at the main levels of ecological and geographical analysis

ГОРОХОВ Алексей Николаевич – к.б.н., с.н.с., Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН. E-mail: algor64@mail.ru

GOROKHOV Aleksey Nikolaevich – Candidate of Biological Sciences, Senior researcher, Institute of Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. E-mail: algor64@mail.ru

of Yakutia: regional, local-regional, and local. At the regional level, the degree of anthropogenic disturbance of landscape regional complexes is revealed. Here data are presented on the changes in the selected research objects at the level of regional complexes. At the local-regional level, the degree of anthropogenic transformation of typological complexes within a certain physical-geographical region is determined. Disturbance of landscapes is determined by the ratio of the sum of the squares of disturbed landscapes with their weight coefficients to the area of natural landscapes. At the local level, the degree of anthropogenic change in landscapes is determined, expressed as a percentage. There are five degrees of disturbance of landscapes: unmodified, slightly modified, significantly modified, heavily modified and transformed landscapes. The proposed method for assessing the disturbance of natural landscapes was used for the following research objects in Southern Yakutia: at the regional level, the territory of the Aldan-Timpton interfluvium is considered (scale 1: 500 000), the local-regional territory is the territory of the Neryungri industrial complex (scale 1: 200 000), the local one is the Elkon deposit (scale 1:25 000). Based on the results of anthropogenic change assessment and using GIS technologies, maps of the degree of anthropogenic transformation of the landscapes of South Yakutia were compiled. The analysis of anthropogenic impact on different spatial-hierarchical levels of landscapes made it possible to reveal the degree of disturbance of their natural state.

Keywords: landscape, level of research, transformation of landscapes, disturbance of the landscape, degree of conversion of landscapes.

Введение

В последнее время вопросам изучения особенностей современного состояния ландшафтов и экологической обстановки в различных регионах России уделяется повышенное внимание [1-4]. Хозяйственная деятельность человека на территории Якутии также приводит к нарушениям и изменениям естественных ландшафтов [5-6].

Актуальность данной проблемы повышается в связи с ростом негативных воздействий на природную среду Якутии и возможных необратимых экологических последствий. Изучение современного состояния ландшафтов является важной частью работ по эколого-географическому анализу территории Якутии. Сложившаяся в последнее время в Якутии ландшафтно-экологическая обстановка требует оценки и отображения антропогенной нарушенности природных ландшафтов. Современное состояние ландшафтов может быть представлено с помощью соответствующих карт нарушенности территории. Для этого необходимо разработать методику объективной оценки и картографирования нарушенности земель.

В данной работе приведен анализ современного состояния ландшафтов Южной Якутии на основе структурной организации и экологического состояния природных комплексов разного уровня. Основной целью исследования является оценка и картографирование антропогенной нарушенности природных ландшафтов на территории Южной Якутии.

Методика и объекты исследований

Вопросы методики изучения экологического состояния ландшафтов и оценки антропогенного воздействия рассматриваются в ряде работ [1, 2, 7-9]. Однако единой методики оценки ландшафтно-экологического состояния территории пока нет, что сдерживает проведение таких исследований, как на региональном, так и на локальном уровнях.

Нами предлагается методика определения степени антропогенной нагрузки и преобразованности территории, учитывающая воздействие на разных ландшафтных уровнях. Оценка степени антропогенного воздействия осуществляется на основных уровнях эколого-географического анализа Якутии: региональном, локально-региональном и локальном.

На *региональном* уровне выявляется степень антропогенной нарушенности ландшафтных региональных комплексов, при этом учитывалось влияние на ландшафтную структуру и функционирование нескольких видов природопользования. Здесь приводятся данные об изменениях выделенных объектов исследования на уровне региональных (физико-географических провинций и районов) комплексов, по которым рассчитываются наиболее важные показатели природопользования и антропогенные нагрузки, характеризующие состояние природной среды.

На *локально-региональном* уровне определяется степень антропогенной трансформации типологических комплексов – типов местности (групп типов урочищ) в пределах определенного физико-географического района.

С целью определения степени нарушенности на региональном и локально-региональном уровнях нами используется несколько видоизмененная методика В.М.Плюснина [10], по следующей формуле:

$$НЛ = (\sum_{i=1}^n b_i S_i) / S, (1)$$

где: НЛ – нарушенность ландшафта; S_i – площадь нарушенных ландшафтов; b_i – балл антропогенной преобразованности; S – площадь природных ландшафтов; n – количество видов нарушений; i – порядковый номер вида нарушений.

Нарушенность ландшафтов определяется по соотношению суммы площадей нарушенных ландшафтов с их весовыми коэффициентами к площади природных ландшафтов (на *региональном* уровне – физико-географических районов, *локально-региональном* – типологических комплексов в пределах определенного физико-географического района).

Для расчета этого показателя антропогенной нагрузки основным видам природопользования присвоен балл антропогенной преобразованности, который возрастает по мере увеличения хозяйственного воздействия. Значения этого балла антропогенной преобразованности определены от 1 до 5. Наибольшая нагрузка отмечается на землях, занятых горными работами и селитьбой – 5 баллов. Естественные земли не используются, поэтому их балл самый низкий – 1. Сельскохозяйственные угодья используются в течение ограниченного периода года, здесь балл поднимается до 2. Гари оценены в 3 балла, вырубки – 4.

На *локальном* уровне используется методика определения степени антропогенной измененности ландшафтов, в основе которой лежит принцип неравнозначности компонентов ландшафта, сформулированный Н.А.Солнцевым [11-12]. При воздействии только на ведомые компоненты ландшафтов ведущие остаются, как правило, неизменными; соответственно, когда изменяется ведущий компонент, ведомые автоматически тоже подвергаются изменению или уничтожению. Оценка степени антропогенной измененности ландшафтов по этой схеме дается в процентах (табл.).

Таблица – Оценка степени антропогенной измененности ландшафтов

№	Степень измененности	%	Характеристики изменений в структуре ландшафтов
1	Неизмененные	0-20	Естественное состояние
2	Слабо измененные	20-40	Образование техногенных форм рельефа; почвенные горизонты остаются ненарушенными; растительность до 90 % естественная
3	Существенно измененные	40-60	Выемка и перемещение грунта при освоении минерального сырья; коренное изменение почв; естественная растительность уничтожена или сильно подавлена
4	Сильно измененные	60-80	Создание искусственных покрытий селитьбы и промзон; почвенные горизонты уничтожаются; нет растительности
5	Преобразованные	>80	Обнажение геологического фундамента, преобладание искусственных поверхностей

Интегральная оценка экологической обстановки представляет собой оценку степени измененности природных ландшафтов и складывается на основе учета критериев нарушенности основных компонентов природной среды. К качественным критериям нарушенности относятся трансформация рельефа и почвенно-растительного покрова.

Методика рассчитана на использование крупномасштабных карт, которые содержат информацию об антропогенной измененности, но в описательном виде. В процессе анализа ландшафтной карты каждый тип урочища должен быть отнесен к одной из категорий. Нами представлен общий каркас методики со ступенью измененности 20 %. В процессе анализа

ландшафтной карты каждый тип урочища должен быть отнесен к одной из категорий степени изменения от 0 до 100 %.

Основным источником информации о состоянии территории является дешифрирование разновременных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Всего выделяется пять степеней трансформации, нарушенности и измененности ландшафтов: неизменные, слабоизмененные, существенно измененные, сильно измененные и преобразованные ландшафты.

В качестве объекта исследований была принята территория Южной Якутии. Это регион наиболее длительного хозяйственного освоения на территории Якутии, где сочетаются как промышленно-преобразованные участки, так и слабоизмененные районы [13].

Предлагаемая методика оценки нарушенности природных ландшафтов была использована на примере следующих объектов исследования: на *региональном* уровне рассматривается территория Алдано-Тимптонского междуречья (масштаб 1:500 000), *локально-региональном* – территория Нерюнгринского промышленного комплекса (масштаб 1:200 000), *локальном* – месторождение «Элькон» Эльконского ураново-рудного района (масштаб 1:25 000) (рис.1).

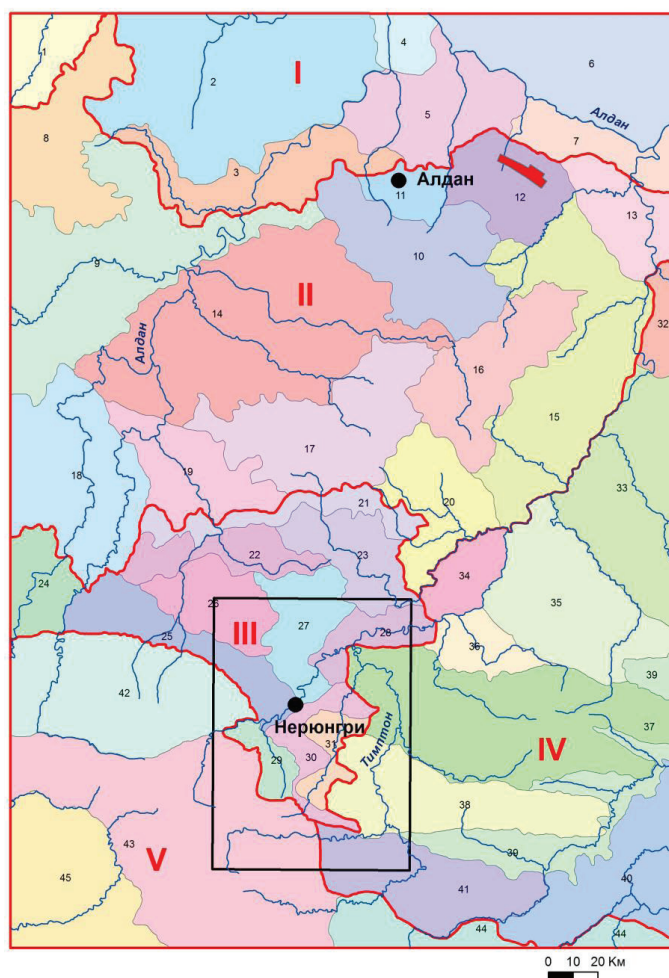


Рис. 1. Физико-географическое районирование территории Алдано-Тимптонского междуречья

□ Нерюнгринский промышленный комплекс,

■ месторождения Эльконского ураново-рудного района

Провинции:

I – Олекмо-Алданская увалистая, II – Олекмо-Тимптонская плоскогорная, III – Чульманская плоскогорная, IV – Тимптоно-Учурская среднегорная, V – Становая среднегорная

1-45 – физико-географические районы

Результаты исследований

Современные ландшафты. Рассматриваемая территория расположена в Южной Якутии на междуречье верховьев Алдана и ее правого притока Тимптона, которая представлена в основном глыбовыми плоскогорьями и хребтами со абсолютными высотами 800-1200 м [14].

Высотные пояса в Южной Якутии имеют следующий спектр – горные пустыни и тундры, подгольцовые кустарниковые заросли, горные редколесья и горная тайга. Также выделяются интразональные долинные и приводораздельно-маревые ландшафты.

Региональный уровень. В пределах Алдано-Тимптонского междуречья выделяются следующие геоморфологические области, соответствующие крупным морфоструктурам: Лено-Алданское плато, Алданское нагорье и структурно-денудационный Становой хребет [14-15]. Рассматриваемая территория располагается в пяти провинциях: Олекмо-Алданской увалистой страны Средней Сибири, а также Олекмо-Тимптонской плоскогорной, Чульманской плоскогорной, Тимптоно-Учурской среднегорной и Становой среднегорной страны гор Южной Сибири [16].

Было проведено физико-географическое районирование Алдано-Тимптонского междуречья с использованием сопряженного анализа природных факторов [17], где основными критериями выделения являются геологические (литологические варианты) и геоморфологические (морфоструктуры среднего порядка) особенности [18-19]. Данная территория делится на несколько частей, различных в морфоструктурном отношении. Это позволило нам выделить 45 физико-географических районов, которые входят в состав вышеуказанных провинций (рис. 1).

Локально-региональный уровень. В физико-географическом отношении исследуемая территория Нерюнгринского промышленного комплекса (НПК) относится к 13 физико-географическим районам Чульманской плоскогорной, Тимптоно-Учурской среднегорной и Становой среднегорной провинциям страны гор Южной Сибири (рис. 1).

Развитие и функционирование ландшафтов данной территории предопределено в основном условиями плоскогорья на архейских кристаллических и юрских терригенных породах, а также высотной поясности с преобладанием горнотаежных и горноредколесных природных комплексов.

Ландшафтную структуру изучаемого района составляют следующие типы местности: горно-привершинный, плоскогорно-привершинный, горно-склоновый, горно-долинный террасовый и горно-долинный [19-20].

Локальный уровень. В физико-географическом отношении месторождения Эльконского уранового района относятся к Эльконскому горстовому району Олекмо-Тимптонской плоскогорной провинции страны Средней Сибири [17].

Ландшафтная структура исследуемого района состоит из четырех типов местности: горно-привершинного, плоскогорно-привершинного, горно-склонового и горно-долинного. Всего было выделено 25 типов урочищ. Наиболее характерным является преобладание крутых склонов с лишайниковыми листовичными рединами с зарослями кедрового стланика на горных примитивных почвах.

В районе месторождения «Элькон» ландшафты развиваются преимущественно под воздействием делювиально-коллювиальных процессов и преобладают природно-территориальные комплексы (ПТК) горно-склонового типа местности.

Степень преобразованности ландшафтов. На *региональном* уровне выявляется степень антропогенной нарушенности ландшафтов. При оценке антропогенной нарушенности изучаются ландшафтные единицы регионального уровня – физико-географических районов.

К нарушенным горными работами площадям на территории Алдано-Тимптонского междуречья относятся земли, занятые разработками золотоносных россыпей (дражные полигоны), карьерами и отвалами рудников золота и угольных разрезов, а также карьеры строительных материалов и других полезных ископаемых. Земли населенных пунктов, промышленных предприятий и построек в их черте относятся к селитьбе. В категорию сельскохозяйственных угодий входят сенокосы и пастбища. Кроме того, пролегают линейные сооружения транспорта: железные дороги и автодорога АЯМ, нефтепровод Восточная Сибирь-Тихий Океан (ВС-ТО) и газопровод «Сила Сибири», а также многочисленные ЛЭП.

На основе показателей нарушенности ландшафтов (НЛ) и с помощью ГИС-технологий была составлена карта степени антропогенной нарушенности ландшафтов Алдано-Тимптонского междуречья [17].

Было проведено ранжирование физико-географических районов по степеням нарушенности ландшафтов (НЛ) и сделан их пространственный анализ. Неизмененные ландшафты занимают 15 физико-географических районов или около 40 % площади Алдано-Тимптонского междуречья, слабоизмененные – 16 районов и 36 %, существенно измененные – 9 районов и 20 %, а сильно измененные – 3 района и 2 %; преобразованные – 2 района и 2 %, соответственно [17].

На *локально-региональном* уровне выявляется степень антропогенной трансформации ландшафтов. При оценке антропогенной трансформации изучаются ландшафтные единицы типологического уровня – типов местности (групп типов урочищ) в пределах определенного физико-географического района.

К нарушенным горными работами площадям здесь относятся земли занятые водохранилищами, дренажными полигонами, а также угольные карьеры, карьеры строительных материалов и других полезных ископаемых. Земли населенных пунктов, промышленных предприятий и построек в их черте относятся к селитбе. Выделяются вырубки и гари.

На основе показателей нарушенности ландшафтов (НЛ) и с помощью ГИС-технологий была составлена карта степени антропогенной трансформации ландшафтов Нерюнгринского промышленного комплекса на локально-региональном уровне масштаба 1:200 000 (рис. 2).

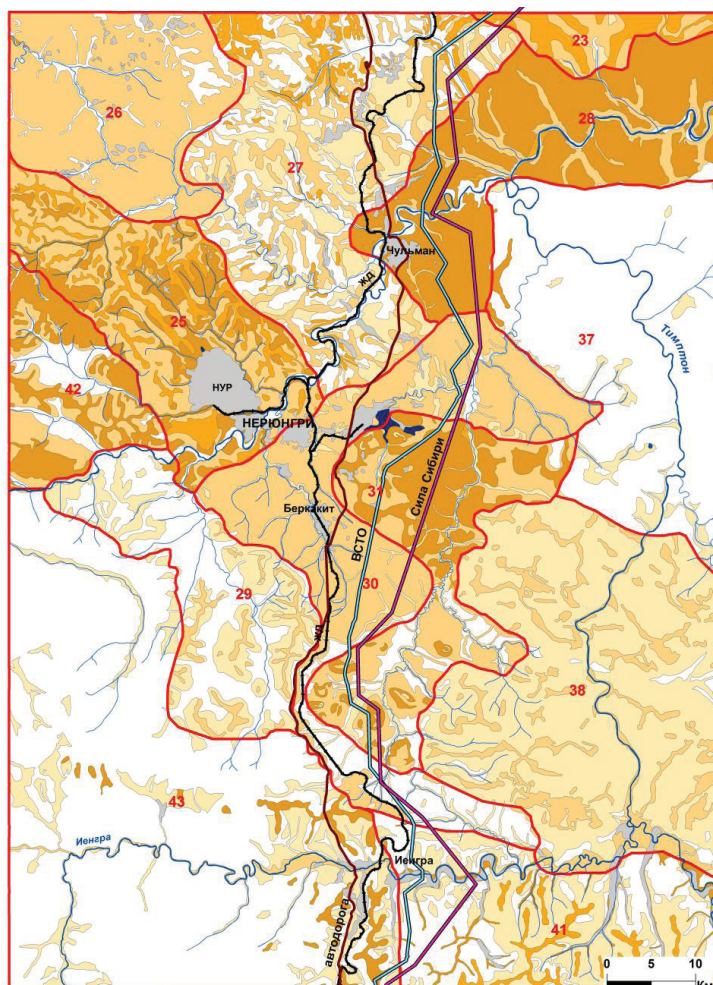
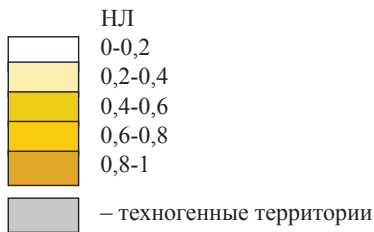


Рис. 2. Степень антропогенной трансформации ландшафтов территории Нерюнгринского промышленного комплекса



23-43 – физико-географические районы

Все типологические ландшафты на локально-региональном уровне испытывают антропогенную нагрузку. В пределах территории Нерюнгринского промышленного комплекса неизменные ландшафты занимают наибольшую площадь – 34,3 % территории. Наименее измененными ландшафтными комплексами остаются склоны средней крутизны и крутые склоны кристаллического подтипа горно-склонового типа местности.

Слабоизмененные ландшафты занимают 29,4 % площади Нерюнгринского промышленного комплекса. Они представлены также в основном склонами средней крутизны кристаллического подтипа горно-склонового типа местности.

Существенно измененные ландшафтам представлены в основном терригенным подтипом плоскогорно-привершинного типа местности и склонами средней крутизны кристаллического подтипа горно-склонового типа местности и занимают 20,2 %.

Терригенный подтип плоскогорно-привершинного типа местности является наиболее сильно измененным ландшафтом территории Нерюнгринского промышленного комплекса – 3,7 %.

Преобразованные или техногенные ландшафты занимают 12,4 % территории Нерюнгринского промышленного комплекса. Наиболее преобразованными комплексами Нерюнгринского промышленного комплекса являются пологие склоны терригенного подтипа горно-склонового типа местности и терригенный подтип плоскогорно-привершинного типа местности, а также склоны средней крутизны горно-склонового типа местности.

На *локальном* уровне определяется степень антропогенной измененности ландшафтов, выражаемая в процентах.

Нарушенные земли здесь представлены горными разработками урановых рудников (шахты и отвалы), дорогами, просеками и т.п.

Результаты оценки антропогенной измененности представлены на карте степени антропогенной измененности ландшафтов месторождения «Элькон» на локальном уровне масштаба 1:25 000 (рис. 3).

Наибольшие площади заняты условно-естественными и неизменными ландшафтами. Почти половину территории лицензионного участка «Элькон» занимают участки с неизменными ландшафтами. Наибольшие площади заняты лиственничниками кедростланиковыми багульниково-моховыми на подбурях типичных на крутых склонах долин рек и горных хребтов и зарослями кедрового стланика кустарничково-лишайниковыми на горных примитивных почвах на крутых склонах долин рек и горных хребтов и приводораздельных выровненных участках горных хребтов.

Участки со слабой степенью измененности занимают 35 % территории месторождения. Они представлены здесь в основном крутыми склонами долин рек и горных хребтов с лиственничными редидами кедровостланиковыми лишайниковыми на горных примитивных почвах и днищем долины р. Элькон.

Существенно измененные ландшафты представлены в основном гарями на горно-склоновом, горно-привершинном и плоскогорно-привершинном типах местности. Они распространены на площади в 16 % территории месторождения «Элькон».

Техногенные ландшафты занимают небольшую площадь – 1,4 % и представляют участки с сильной степенью измененности. Преобразованные ландшафты на территории месторождения «Элькон» не были выделены.

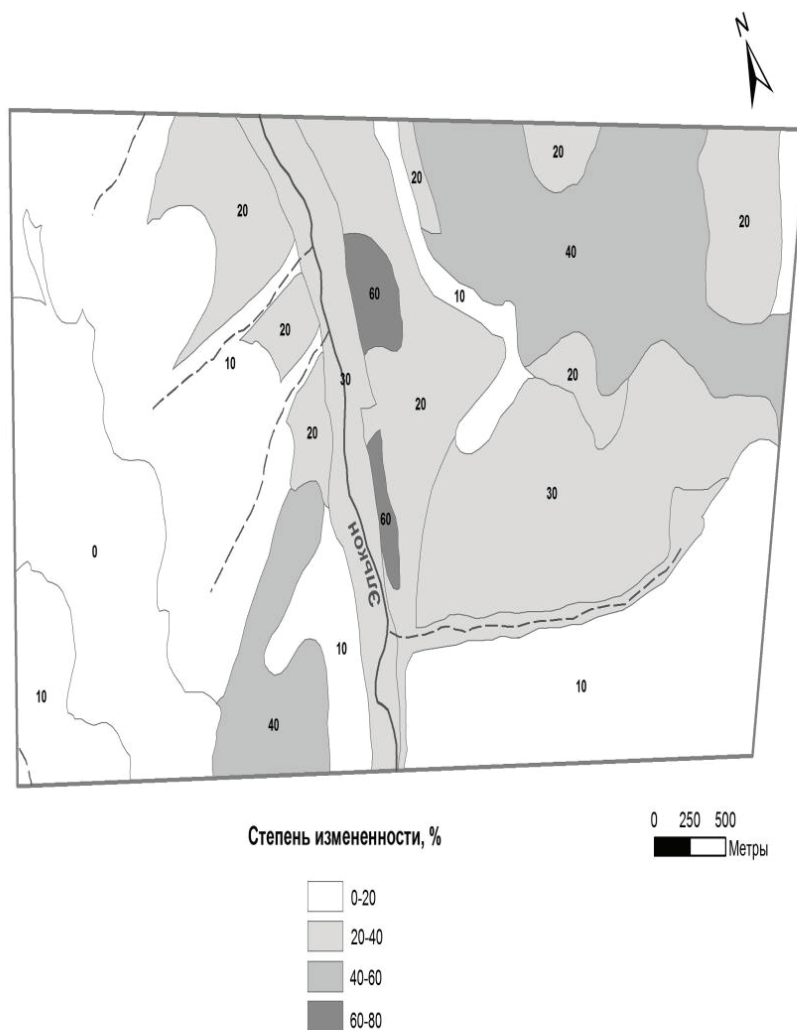


Рис. 3. Степень антропогенной измененности ландшафтов месторождения «Элькон»

Количественная оценка площади нарушенных территорий показала, что ландшафты Эльконского ураново-рудного района испытывают слабую или незначительную нарушенность.

Таким образом, анализ современного состояния ландшафтов Южной Якутии, выполненный на основе исследования антропогенной нагрузки на ландшафты различного пространственно-иерархического уровня свидетельствует о существенных изменениях ландшафтов региона.

Заключение

На основе соотнесения иерархически соподчиненных закономерно обусловленных ландшафтов Южной Якутии к различным видам нарушений наглядно выделяется характер и степень их измененности. На региональном уровне наиболее преобразованными региональными комплексами Алдано-Тимпонского междуречья являются Хатыминский плоскогорный и Чульманский плоскогорный физико-географические районы. На локально-региональном – на территории Нерюнгринского промышленного комплекса выделяется Чульманский плоскогорный район, где наиболее преобразованными комплексами являются пологие склоны горно-склонового типа местности, а также терригенный подтип плоскогорно-привершинного типа местности. На локальном – на территории лицензионного участка «Элькон» антропогенному изменению в наибольшей степени подверглись урочища горно-склонового типа местности.

Анализ антропогенного воздействия на разных пространственно-иерархических уровнях ландшафтов позволяет выявить степень нарушенности их естественного состояния.

Рассматриваемая методика дает представление о современном этапе антропогенизации исследуемых территорий и является своего рода точкой отчета при рассмотрении прогнозных вариантов их экологических ситуаций.

Литература

1. Антипова А.В. География России. Эколого-географический анализ территории. – М.: Изд-во Междунар.независимого экол.-политол. ун-та, 2001. – 208 с.
2. Исаченко А.Г. Экологическая география России. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2001. – 328 с.
3. Плюснин В.М. Ландшафтный анализ горных территорий. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2003. – 257 с.
4. Ермолаев О.П., Игонин М.Е., Бубнов А.Ю., Павлова С.В. Ландшафты Республики Татарстан. Региональный ландшафтно-экологический анализ. – Казань: Слово, 2007. – 411 с.
5. Иванов В.В. Трансформация природных комплексов при недропользовании в условиях Якутии. – Новосибирск: Наука, 2015. – 248 с.
6. Горохов А.Н. Оценка степени техногенного воздействия на природные комплексы Верхоянского района Республики Саха (Якутия) / А.Н. Горохов, В.В. Иванов, З.А. Кудинова, А.А. Петров // Горный журнал. – 2016. – № 9. – С.89-94.
7. Мильков Ф.Н. Человек и ландшафты. – М.: Мысль, 1973. – 224 с.
8. Дьяконов К.Н. Методология и проблемы эколого-географической экспертизы / К.Н. Дьяконов, А.В. Дончева, Т.В. Звонкова, Л.К. Казаков // Вестн. Моск. ун-та. Сер. геогр. – 1994. – № 1. – С.10.
9. Кочуров Б.И. Экодиагностика и сбалансированное развитие. – М.; Смоленск: Манджента, 2003. – 387 с.
10. Плюснин В.М. О нарушенности естественных ландшафтов Предбайкалья / В.М. Плюснин // География и природные ресурсы. – 1994. – № 1. – С. 22-28.
11. Солнцев Н.А. Учение о ландшафте: Избранные труды. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. – 384 с.
12. Пучкин А.В. Картографирование антропогенной измененности ландшафтов / А.В. Пучкин // География и природные ресурсы. – 2007. – № 4. – С. 130-134.
13. Иванов В.В. и др. Природно-техногенные экосистемы Южной Якутии. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 186 с.
14. Южная Якутия / под ред. В.А.Кудрявцева. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. – 444 с.
15. Оспенников Е.Н. и др. Экзогенные геологические процессы и явления (Южная Якутия). – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. – 227 с.
16. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР. М-6 1:2 500 000 / Отв. ред. П.И.Мельников. – М.: ГУГК, 1991. – 2 л.
17. Горохов А.Н. Антропогенная нарушенность природных ландшафтов Южной Якутии / А.Н. Горохов // Проблемы региональной экологии. – 2013. – № 1. – С.46-51.
18. Босиков Н.П., Васильев И.С., Федоров А.Н. Мерзлотные ландшафты зоны освоения Лено-Алданского междуречья. – Якутск: Ин-т мерзловедения СО АН СССР, 1985. – 124 с.
19. Федоров А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии. Методика выделения и вопросы картографирования. – Якутск: Ин-т мерзловедения СО АН СССР, 1991. – 140 с.
20. Федоров А.Н., Ботулу Т.А., Варламов С.П. и др. Мерзлотные ландшафты Якутии (Пояснительная записка к «Мерзлотно-ландшафтной карте ЯАССР»). – Новосибирск: ГУГК, 1989. – 170 с.

References

1. Antipova A.V. Geografiya Rossii. Ekologo-geograficheskij analiz territorii. – M.: Izd-vo Mezhdunar. nezavisimogo ekol.-politol. un-ta, 2001. – 208 s.
2. Isachenko A.G. Ekologicheskaya geografiya Rossii. – Sankt-Peterburg: Izd-vo SPbGU, 2001. – 328 s.
3. Plyusnin V.M. Landshaftnyj analiz gornyh territorij. – Irkutsk: Izd-vo In-ta geografii SO RAN, 2003. – 257 s.
4. Ermolaev O.P., Igonin M.E., Bubnov A.YU., Pavlova S.V. Landshafty Respubliki Tatarstan. Regional'nyj landshaftno-ekologicheskij analiz. – Kazan': Slovo, 2007. – 411 s.

5. Ivanov V.V. Transformaciya prirodnih kompleksov pri nedropol'zovanii v usloviyah YAkutii. – Novosibirsk: Nauka, 2015. – 248 s.
6. Gorohov A.N. Ocenka stepeni tekhnogenogo vozdeystviya na prirodnye komplekсы Verhoyanskogo rajona Respubliki Saha (YAkutiya) / A.N. Gorohov, V.V. Ivanov, Z.A. Kudinova, A.A. Petrov // Gornyj zhurnal. – 2016. – № 9. – S.89-94.
7. Mil'kov F.N. CHelovek i landshafty. – M.: Mysl', 1973. – 224 s.
8. D'yakonov K.N. Metodologiya i problemy ekologo-geograficheskoy ekspertizy / K.N. D'yakonov, A.V. Doncheva, T.V. Zvonkova, L.K. Kazakov // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. geogr. – 1994. – № 1. – S.10.
9. Kochurov B.I. Ekodiagnostika i sbalansirovannoe razvitie. – M.; Smolensk: Mandzhenta, 2003. – 387 s.
10. Plyusnin V.M. O narushennosti estestvennyh landshaftov Predbajkal'ya / V.M. Plyusnin // Geografiya i prirodnye resursy. – 1994. – № 1. – S. 22-28.
11. Solncev N.A. Uchenie o landshafte: Izbrannye trudy. – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2001. – 384 s.
12. Puchkin A.V. Kartografirovanie antropogennoj izmenennosti landshaftov / A.V. Puchkin // Geografiya i prirodnye resursy. – 2007. – № 4. – S. 130-134.
13. Ivanov V.V. i dr. Prirodno-tekhnogennye ekosistemy YUzhnoj YAkutii. – M.: ООО «Nedra-Biznescentr», 2006. – 186 s.
14. YUzhnaya YAkutiya / pod red. V.A.Kudryavceva. – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1975. – 444 s.
15. Ospennikov E.N. i dr. Ekzogennye geologicheskie processy i yavleniya (YUzhnaya YAkutiya). – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1980. – 227 s.
16. Merzlotno-landshaftnaya karta YAkutskoj ASSR. M-b 1:2 500 000 / Otv. red. P.I.Mel'nikov. – M.: GUGK, 1991. – 2 l.
17. Gorohov A.N. Antropogennaya narushennost' prirodnih landshaftov YUzhnoj YAkutii / A.N. Gorohov // Problemy regional'noj ekologii. – 2013. – № 1. – S.46-51.
18. Bosikov N.P., Vasil'ev I.S., Fedorov A.N. Merzlotnye landshafty zony osvoeniya Leno-Aldanskogo mezhdurech'ya. – Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1985. – 124 s.
19. Fedorov A.N. Merzlotnye landshafty YAkutii. Metodika vydeleniya i voprosy kartografirovaniya. – Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1991. – 140 s.
20. Fedorov A.N., Botulu T.A., Varlamov S.P. i dr. Merzlotnye landshafty YAkutii (Poyasnitel'naya zapiska k “Merzlotno-landshaftnoj karte YAASSR”). – Novosibirsk: GUGK, 1989. – 170 s.

С.С. Нехин, Н.М. Бабашкин

ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», г. Москва, Россия

ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ И КАДАСТРА

Аннотация. Исследовано современное состояние дел с использованием результатов лазерного сканирования для целей топографического картографирования, кадастра и получения пространственной информации для решения других задач в России и за рубежом. Рассмотрены проблемы, присущие воздушному лазерному сканированию с пилотируемых и беспилотных воздушных судов (БВС). В частности, для систем лазерного сканирования, устанавливаемых на БВС, имеют место сдерживающие факторы их применения, а именно существующие организационно-правовые ограничения доступа БВС к воздушному пространству и обеспечение безопасности полетов, в том числе в ночное время. Системам лазерного сканирования, устанавливаемым на пилотируемые воздушные суда присущи проблемы высокой стоимости оборудования и ПО, а также ограниченное и с каждым годом сокращающееся количество специально оборудованных носителей, способных обеспечить эффективное лазерное сканирование с больших высот.

Показаны перспективы и направления применения лазерного сканирования для целей топографического картографирования, кадастра, получения пространственной информации в целях создания цифровых двойников территорий и объектов, связанные с внедрением технологий лазерного сканирования в работы по созданию городов-миллионников в Сибири, созданием единой электронной картографической основы (ЕЭКО), получением совершенно особенного вида продукции – высокоточной топообатиметрической лазерной съемки.

Даны предложения по задачам, требующим решения для более интенсивного внедрения технологий лазерного сканирования в производство работ Росреестра и других ведомств: разработка на основе проведения опытно-производственных работ нормативно-технических документов, стандартов, а также документов, регламентирующих временные и финансовые затраты производства работ с учетом новых подходов к оценке эффективности использования технологий лазерного сканирования, связанных с новыми видами продукции, многоцелевым применением пространственной информации в различных отраслях хозяйства страны, многократным использованием информации по принципу «получил один раз, используй многократно».

Ключевые слова: воздушное, наземное лазерное сканирование, пилотируемое, беспилотное воздушное судно, мобильная лазерная система, топографическое картографирование, кадастр, цифровые двойники, нормативное регулирование.

S.S. Nekhin, N.M. Babashkin

Center of Geodesy, Cartography and SDI, Moscow, Russia

LASER SCANNING AND PROSPECTS OF ITS APPLICATION FOR THE PURPOSES OF TOPOGRAPHIC MAPPING AND CADASTRE

Abstract. The article investigates the current state of affairs concerning the use of laser scanning results for the purposes of topographic mapping, cadastre and obtaining spatial information in Russia and abroad. The problems inherent in aerial laser scanning from manned and unmanned aerial vehicles (UAVs) are considered. In particular,

НЕХИН Сергей Степанович – д.т.н., с.н.с., ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД». E-mail: nekhin_ss@nsdi.rosreestr.ru

NEKHIN Sergey Stepanovich – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Center of Geodesy, Cartography and SDI. E-mail: nekhin_ss@nsdi.rosreestr.ru

БАБАШКИН Николай Михайлович – зам. начальника отдела ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД». E-mail: babashkin_nm@nsdi.rosreestr.ru

BABASHKIN Nikolay Mikhaylovich – Deputy head of the department Center of Geodesy, Cartography and SDI. E-mail: babashkin_nm@nsdi.rosreestr.ru

for laser scanning systems installed on UAVs, there are constraining factors of their application, namely the existing organizational and legal restrictions on UAV access to airspace and ensuring flight safety, including at night. Laser scanning systems installed on manned aircraft are characterized by problems of high cost of equipment and software, as well as a limited and every year decreasing the number of specially equipped carriers capable of providing effective laser scanning from high altitudes.

The prospects and directions of laser scanning technologies application for the purposes of topographic mapping, cadastre, obtaining spatial information in order to create digital twins of territories and objects are shown. These prospects and directions are associated with the implementation of laser scanning technologies in the creation of cities with the millions of people in Siberia, the creation of an unified electronic cartographic framework (UECF), obtaining a very special type of product – high-precision topobathymetric laser surveying.

Proposals on the tasks requiring solutions for more intensive introduction of laser scanning technologies in the production works of Rosreestr and other departments are given. These proposals include the development on the basis of pilot production works of regulatory and technical documents, standards as well as the documents regulating the time and financial costs of work, taking into account new approaches to assessing the effectiveness of using of the laser scanning technologies. These approaches are associated with new types of products, multipurpose application of spatial information in various branches of the country's economy, multiple the use of information on the principle of "received once, use repeatedly".

Keywords: geological practice, digital surface model, modeling of stratigraphic units, modeling, wireframe model, Tomponsky training ground, cuts, contours, digital twin, Micromine.

Введение

Методы и технологии получения пространственной информации переживают во всем мире революционные изменения. Интенсивно развиваются и совершенствуются методы и системы лазерного сканирования (ЛС). Особенно быстрый прогресс наблюдается для систем лазерного сканирования, устанавливаемых на беспилотные воздушные суда (БВС) и мобильных лазерных систем (МЛС). Быстрые темпы внедрения в практику производственных работ современных технологий лазерного сканирования, несмотря на высокую стоимость используемых аппаратно-программных средств, обусловлены целым рядом их преимуществ по сравнению с классическими методами съемки, и, в частности, повышением показателей производительности и сокращением сроков полевых работ.

Основные виды работ, в которых активно используются системы лазерного сканирования, сопряжены с наиболее важными для Российской Федерации отраслями экономики – нефтегазовой, энергетикой, промышленными, инфраструктурными проектами, строительством [1]. Конкретными задачами, решаемыми с применения систем ЛС в отечественной практике, является мониторинг объектов, контрольные съемки и сбор данных для проектирования, в том числе с пилотируемых и беспилотных воздушных судов.

В научных публикациях практически не рассматривается тематика исследований по вопросу использования лазерного сканирования для целей топографического картографирования и кадастра. Отечественные публикации, в основном, касаются полученных результатов лазерного сканирования, а на их основе делаются выводы о возможности применения данной технологии для решения широкого спектра задач. Отмечается в качестве современного тренда применение и одновременная обработка большого объема данных облаков точек от нескольких лазерных систем (в том числе разного вида, например, воздушных и мобильных). Это с одной стороны повышает производительность метода, но с другой стороны и удорожает стоимость продукции, а значит, ограничивает область применения ЛС.

Координатное обеспечение Единого Государственного реестра недвижимости (ЕГРН), землеустройства и мониторинга земель наряду с традиционными картографическими и фотограмметрическими материалами, которые используются при составлении планов земельных участков, прилагаемых к документам, удостоверяющим права на эти участки, также может основываться на современных лазерных технологиях.

Однако актуальной на данный момент проблемой является отсутствие нормативных документов, регламентирующих правила выполнения воздушно-лазерного сканирования [1–3], а также нормирования (нормы времени и финансовые затраты) технологических процессов проведения всего комплекса лазерного сканирования от полевых работ до обработки получен-

ного материала, для подсчёта сметной стоимости работ. Следует подчеркнуть, что за рубежом, например, в США [1] существуют стандарты сбора данных воздушного лазерного сканирования, в которых регламентируются требования к точности, формату, классификации данных лазерного сканирования. Например, для номинальной точности 0,35 и 1,41 м плотность сканирования должна составлять не менее 8 и 0,5 точек/м² соответственно.

Целью данного исследования является анализ состояния дел с практическим использованием методов и технологий лазерного сканирования для целей топографического картографирования, кадастра, и получения пространственных данных, выявление проблем и выработка рекомендаций, направленных на более оперативное и эффективное внедрение ЛС в практику отечественных производственных работ.

Состояние и проблемы использования систем лазерного сканирования

За рубежом почти полвека, а в России чуть меньше активно разрабатываются и совершенствуются методы и технологии лазерного сканирования. Без них уже трудно обойтись во многих отраслях, таких как горнодобывающая, транспортные системы, промышленность, топографические съемки, архитектура, археология, гражданское строительство, мониторинг объектов, моделирование городов и прочее. Вместе со всем очевидными традиционными применениями лазерного сканирования требуется говорить и о таких новых перспективных направлениях применения ЛС, как создание цифровых двойников, эффекте присутствия, умной цифровой реальности [1, 5–7]. Находят свое применение системы воздушного лазерного сканирования (ВЛС), мобильные и стационарные наземные системы ЛС. Как показывает практика, хорошие результаты дает интеграция материалов лазерного сканирования и фотограмметрии [8].

Системы ВЛС, устанавливаемые на БВС, вследствие ограниченной высоты полета носителя обладают более высокой точностью (при худшей относительной точности), но и существенно меньшей производительностью по отношению к системам ЛС, устанавливаемым на пилотируемые воздушные суда (ПВС). В этой связи уровень их эффективного применения для картографирования и кадастра пока невысок (особенно в России), а ограничивается, в основном, задачами крупномасштабной и сверх крупномасштабной съемки незначительных по площади участков местности и отдельных компактных объектов. При этом прослеживаются тенденции их развития, связанные с повышением грузоподъемности новых моделей БВС и одновременным снижением веса самих систем лазерного сканирования для БВС.

Однако экономические факторы во многом могут ускорить тенденцию перехода от пилотируемых систем к беспилотным, несмотря на меньшую производительность и относительную точность последних. Один из этих факторов, и немаловажный, это общая стоимость затрат на покупку, содержание и эксплуатацию оборудования. Современная практика показывает, что даже самые дорогие беспилотные лазерные системы стоят значительно меньше, чем классические самолетные. Дешевле также обходится подготовка пилотов и их работа. Причем речь идет не только о финансовых, но и временных затратах. Это особенно важно для небольших компаний или государственных организаций, которые ограничены в бюджетных расходах и штате квалифицированных сотрудников. В таких случаях можно быстро и сравнительно недорого подготовить оператора – внешнего пилота. Кроме того, беспилотные системы обладают большей оперативностью получения и использования пространственной информации по сравнению с пилотируемыми, особенно для ограниченных по площади объектов работ.

Вместе с тем пока для систем лазерного сканирования, устанавливаемых на БВС, имеют место сдерживающие факторы их применения, а именно существующие организационно-правовые ограничения доступа БВС к воздушному пространству и обеспечение безопасности полетов, в том числе в ночное время, а также возможность поломки и даже безвозвратной потери носителя и съемочного оборудования в процессе съемки. Аналогичные проблемы имеют место и в других странах [9–11]. В США [10] БВС используются для решения самых разных коммерческих задач, от фотографирования недвижимости до топографического картографирования. Подавляющее большинство этих задач выполняется вне рамок коммерческих правил эксплуатации, установленных Федеральным авиационным управлением (ФАУ). 15 февраля 2015 г. ФАУ опубликовало Уведомление о предлагаемых правилах для малых беспилотных авиационных систем (sUAS). По этим правилам БВС весом до 25 кг могут управляться оператором

в воздушном пространстве класса G (максимальная воздушная скорость 100 миль в час и максимальная высота 500 футов) в светлое время суток в пределах прямой видимости без уведомления ФАУ. Полеты в пространстве классов B, C, D и E разрешены с одобрения службы управления воздушным движением (УВД), но запрещена ретрансляция управления от оператора к оператору. Если в 2014 г. были выданы лицензии на эксплуатацию БВС всего лишь по 9 заявкам (в основном для выполнения НИР университетам), после публикации Уведомления в 2015 г. лицензий было выдано уже более полутора тысяч.

Применительно к Российской Федерации в настоящий момент БВС не обладают равными правовыми возможностями в использовании воздушного пространства по сравнению с пилотируемыми судами, поэтому после получения всех разрешений и согласований операторам БВС необходимо получать разрешение от диспетчера Единой системы управления воздушным движением (ЕС УВД) о закрытии зоны аэросъемки для других (пилотируемых) воздушных судов на высоте производства аэросъемочных полетов. В этой связи требует совершенствования законодательная база использования БВС.

Следует отметить, что некоторые шаги в этой области хоть и очень медленно и нерешительно, но предпринимаются. В частности, принято постановление Правительства «О внесении изменений в Федеральные правила использования воздушного пространства» (2020 г.). По новым правилам разрешаются полеты БВС весом до 30 кг в светлое время суток в прямой видимости до 500 метров и до 150 метров в высоту. Прежде для проведения полетов беспилотных воздушных судов требовалось заранее подавать заявление, а согласование времени и маршрута полета длилось несколько дней. Это демонстрирует определенный шаг в направлении беспрепятственного использования беспилотников, потому что становится возможным их коммерческое применение на ограниченном по дальности и высоте пространстве.

Следующим шагом должно стать законодательное регламентирование оснащения БВС устройством «все видят каждого и каждый видит всех», разрешить полеты за пределами прямой видимости на необходимых высотах на всей территории РФ. Тогда целесообразность использования БВС на объектах площадью до 20 кв. км возрастет до площади нескольких тысяч км² [12].

Системы лазерного сканирования, устанавливаемые на ПВС, не подвержены негативному воздействию вышеуказанных факторов и обладают высокой производительностью. Но им присущи проблемы другого характера. В частности, экономически трудно в кратковременный срок окупить высокую стоимость оборудования и ПО, используя лазерное сканирование только для решения узкоспециализированных задач и получения конкретно ориентированной продукции, например, цифровой модели рельефа (ЦМР). Следует также отметить, что для выполнения эффективного лазерного сканирования с больших высот требуются специально оборудованные для установки лазерной аппаратуры самолеты, количество которых в России ограничено и сокращается. Кроме того, существует реальная опасность выхода из строя лазерной аппаратуры из-за паразитного отражения импульса от первой же поверхности стекла. Обойти этот недостаток можно, установив, например, герметичный колпак над сканером вместо стекла под ним в случае съемки с высот более 3 км.

Мобильное лазерное сканирование наряду с воздушным (пилотируемым и беспилотным) также позволяет получать большой объем съемочной информации, которая используется для создания планов и цифровых моделей в основном линейных объектов (полотна автомобильных и железных дорог), 3D-моделей дорожной и городской инфраструктуры. Его преимущества заключаются в возможности получения исчерпывающей информации об инфраструктурных объектах, которые не могут быть получены с помощью воздушных носителей или их получение затруднено. Во многих случаях технология МЛС успешно дополняет воздушное сканирование. С использованием данной технологии оперативно решаются многие типовые задачи, относящиеся к проектированию, реконструкции, ремонту автомобильных и железных дорог и их инвентаризации. МЛС целесообразно использовать для специальных видов топографической съемки, в том числе для картографирования береговой зоны, водохранилищ, инспекции комплексов продуктопроводов, ЛЭП и при решении других задач.

Своя ниша в практическом использовании имеется и для *портативных (или переносных) лазерных систем* (ручного, рюкзачного и тележечного типов). В перспективе эти системы могут

найти эффективное применение в набирающем в последние годы популярность 3D-кадастре, особенно применительно к многоуровневым зданиям, внутренним помещениям, подземным пространствам.

В качестве основного фактора, сдерживающего еще более бурный прогресс систем лазерного сканирования, следует указать высокую стоимость оборудования и ПО. Особенно это касается воздушных систем лазерного сканирования. Даже лёгкие лазерные сканеры, используемые с БВС, имеют высокую стоимость, при этом в их использование требуется закладывать соответствующие риски потери или поломки в нештатных ситуациях. Вместе с тем ситуация может измениться в сторону опережающего развития ВЛС с БВС, чему наряду с прогрессом в развитии этих систем может способствовать складывающаяся в стране критическая ситуация с сокращающимся количеством пилотируемых аэрофотосъёмочных воздушных судов (с 2022 г. приостанавливается эксплуатация двухмоторных самолетов Л-410 до выяснения причин их катастроф).

Лазерное сканирование в целях топографического картографирования и кадастра

Технологии лазерной съемки в отличие от традиционных методов аэрофототопографической съемки имеют принципиальное отличие, связанное с увеличением доли камеральных процессов по отношению к полевым работам и повышением роли программного обеспечения для обработки облаков точек лазерных отражений (ТЛО). В этой связи автоматическая идентификация объектов по облакам точек является на сегодняшний день чрезвычайно актуальной задачей, поэтому финансовые расходы и временные затраты на обработку данных, характеризующуюся значительной трудоемкостью, во всем мире и в России достаточно высоки. Для ускорения этого процесса некоторые фирмы, например, Leica Geosystems рекомендует использовать параллельную обработку на нескольких компьютерах, организованных в кластер. Данные могут находиться в одном централизованном хранилище, либо для входных и выходных потоков могут использовать физически разные устройства (хранилища).

Национальные программы лазерного сканирования действуют в ряде стран Европы (Финляндия, Франция, ФРГ) и США [1, 5]. Плотность покрытия составляет 5–10 точек/м², а точность определения пространственных координат до 5–10 см. В процессе государственного исследования, выполненного в США, выявлено около 600 направлений применения результатов лазерного сканирования.

Национальная программа ЛС Финляндии начата в 2008 г. и предполагает обновление данных на всю страну каждые шесть лет. С 2020 г. плотность покрытия данными ЛС составляет 5 точек/м². Данные ВЛС используются для ведения и актуализации топографической БД, которая является источником пространственных данных для строительства, планирования землепользования, сельского, лесного хозяйства. В 2022 г. планируется создание на территорию страны 3D-моделей зданий.

Национальный проект Франции 2021–2025 гг. с бюджетом 60 млн. € предполагает создание «Цифрового двойника» государства, предназначенного для использования во многих областях экономики страны. Проектируемая плотность покрытия данными лазерного сканирования – не менее 10 точек/м².

В 2014 г. фирма Hexagon организовала периодическую аэрофотосъемку всей территории США с размером пикселя на местности 30 см, а с 2015 г. начата такая же аэрофотосъемка в Европе. В 2020 г. стартовала аэрофотосъемка с ВЛС системой Terrain Mapper территории США с разрешением на местности 15 см, а для городов – 5 см.

В Европе аналогичные съемки выполняются с разрешением на местности 15 см, для городов – 7,5 см.

В Китае в соответствии с требованиями нормативных документов точность сельских кадастровых данных должна соответствовать точности топографического плана масштаба 1:500. В [13] приводится опыт, сочетающий использование ВЛС с беспилотника и МЛС с автомобиля, обеспечивающий точность координатных определений (СКП) 4,7 см. Отмечены преимущества технологии, выражающиеся в возможности съемки в вечернее время, отсутствии необходимости в опорных точках и высокой степени автоматизации.

В России технологии лазерного сканирования пока в большей степени ориентированы на

использование их результатов для проектирования, строительства и мониторинга линейных объектов, промышленных и инфраструктурных объектов. В целях топографического картографирования и кадастра работы находятся в начальной стадии. Выполненный анализ использования технологий лазерного сканирования в России и за рубежом позволяет сделать вывод о том, что на сегодняшний день уровень внедрения Росреестром технологий ЛС для целей топографического картографирования и кадастра недостаточен и требует более масштабного и многоцелевого их распространения. На рис. 1 приведена применяемая в настоящее время Росреестром технологическая схема создания единой электронной картографической основы (ЕЭКО), а на рис. 2 – показана предлагаемая перспективная технологическая схема создания продукции с использованием лазерного сканирования, позволяющая получать дополнительные виды продукции в виде ЦМР, цифровой модели поверхности (ЦМП), фотореалистичной модели объекта (местности).



Рис. 1. Базовая технология создания ЕЭКО

Кадастр и землеустройство – это те области, в которые проникновение методов лазерного сканирования происходит наиболее медленно, несмотря на то, что имеется целый ряд задач, в которых эти методы могут найти свое эффективное применение. Это: подготовка межевых и кадастровых планов; составление и актуализация технических планов предприятий, особенно конструктивно сложных объектов; создание карт и планов объектов землеустройства; определение границ и площадей промышленных объектов, объектов землеустройства, охранных зон протяженных линейных объектов.

Исходя из опыта создания 3D-кадастра ряда европейских стран и учитывая, что в настоящее время при проектировании зданий или сооружений (будущих объектов кадастрового учета) широко используются автоматизированные системы трехмерного проектирования, базой для трехмерного кадастра являются трехмерные геоинформационные системы (ГИС), а первым этапом их формирования является создание трехмерных моделей местности, в том числе на основе материалов лазерного сканирования.

Данные лазерного сканирования совместно с ортофотизображениями могут использоваться для координатного описания кадастровых объектов, таких, как здания или элементы инженерной инфраструктуры.

Свою нишу технологии лазерного сканирования могут успешно занять в лесном и водном кадастрах, кадастре объектов придорожной инфраструктуры.



Рис. 2. Технология создания продукции с использованием лазерного сканирования

Особой сферой применения методов лазерного сканирования в ближайшей перспективе может стать так называемый *3D-кадастр*. Эксперименты по созданию 3D-кадастра в России, и тем более за рубежом проводятся не впервые. Изучением проблем, возникающих при регистрации трехмерных объектов недвижимости, занимаются рабочие группы Международной федерации геодезистов (FIG): Комиссия 3 (Spatial Information Management) и Комиссия 7 (Cadastral and Land Management). Регулярно проводятся международные семинары по 3D-кадастру. Поиск путей перехода от 2D-кадастров к 3D-кадастрам интенсивно ведется в целом ряде стран [14]. Из зарубежных стран наибольшие успехи в области 3D-кадастра достигнуты в Австралии, Испании, Италии, Кипре, Нидерландах, Норвегии, Хорватии, Швеции. При этом проблема регистрации в системе 3D-кадастра в большинстве стран вызывает затруднение, так как первоначально системы разрабатывались под двумерные объекты недвижимости. Трудности перехода к трехмерному кадастру, как правило, определяются особенностями государственного законодательства, а также структурными формами и видами действующей кадастровой регистрации. Так как уровень развития кадастра в большинстве стран пока не является совершенным, поэтому до сих пор вряд ли возможно назвать страну, которую можно было бы считать полностью перешедшей к 3D-кадастру.

Что касается России, в стране также уже более десятилетия ведутся разработки в области трехмерного представления пространственных данных, в том числе для кадастра [15]. Технологии на основе использования наземных переносных лазерных систем должны занять в этой сфере свое прочное место. Актуальной проблемой является разработка требований к применению ЛС для трехмерного кадастра.

Важную роль во внедрении технологий лазерного сканирования должна играть техническая стандартизация. В 2021 г. приняты разработанные ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД» и ООО «Геоскан» национальные стандарты ГОСТ Р 59328 Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования и ГОСТ Р 59562 Съёмка аэрофототопографическая. Технические требования, в которых наряду с фотографическими системами регламентируется использование

систем воздушного лазерного сканирования. Вместе с тем имеется необходимость в разработке и специальных национальных стандартов, в которых детально излагались бы требования к проектированию, выполнению лазерного сканирования для решения различных задач, а также к обработке и использованию получаемых материалов ЛС, в том числе:

- национального стандарта по применению технологии воздушного и наземного мобильного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки при выполнении топографического картографирования и кадастровых работ;
- национального стандарта по применению технологии воздушного, наземного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки при выполнении инженерно-геодезических изысканий.

Результаты исследования и рекомендации

Национальные программы лазерного сканирования запущены в целом ряде европейских стран и США. Вместе со всем очевидными традиционными применениями лазерного сканирования требуется говорить и о таких новых перспективных направлениях применения, как создание цифровых двойников, эффекте присутствия, дополненной и виртуальной реальности, умной цифровой реальности, искусственном интеллекте [1, 5–7]. В таких отраслях, как строительство и инфраструктура указанные технологии наряду со специализированными, отраслевыми (BIM-технологии) приводят к почти революционным изменениям, формируя не только новые подходы к созданию объектов, но способствуя формированию целой экосистемы. В частности, такой процесс мы наблюдаем в отношении цифровых двойников, причем как для отдельных объектов и ограниченных территорий, так и для всей поверхности суши земного шара [7].

В этой связи весьма актуальным может оказаться внедрение технологий лазерного сканирования в работы по созданию городов-миллионников в Сибири, о которых говорил в своем недавнем выступлении Президент Российской Федерации В.В. Путин. Бюджет России при этом сможет сэкономить сотни миллионов рублей в процессе проектирования и будущей эксплуатации территорий этих городов и окружающей инфраструктуры, получив для них высокоточные и детальные пространственные данные.

Для всестороннего анализа эффективности использования систем лазерного сканирования в целях топографического картографирования, кадастра и инженерных изысканий необходимо проведение опытно-производственных работ с хронометражными наблюдениями технологических процессов ЛС на основе использования воздушных, мобильных и стационарных систем с анализом временных, трудовых и финансовых затрат, разработки нормативно-технических документов и нормирования технологических процессов производства работ.

При этом необходимы новые подходы к оценке эффективности использования технологий лазерного сканирования, связанные с:

- новыми видами продукции наряду с традиционными;
- многоцелевым применением пространственной информации в различных отраслях хозяйства страны;
- многократным использованием информации по принципу «получил один раз, используй многократно».

Для каждого конкретного проекта необходимо тщательно просчитывать экономическую составляющую работ и их производительность.

С внедрением в производство работ Росреестра технологий лазерного сканирования, безусловно, должна повыситься достоверность и детальность единой электронной картографической основы (ЕЭКО), а, следовательно, и ее потребительские качества.

Другим важным направлением применения методов лазерного сканирования следует рассматривать создание высокоточных ЦМР для уточнения высотной основы зон подтопления на территорию России, так как актуальность этой проблемы с каждым годом все более и более возрастает.

Совершенно особенный вид продукции может быть получен в результате совместного использования цифровой аэрофотосъемки, топографического и батиметрического сканеров [16–17]. Такой вид съемки актуален для государств, имеющих значительную по протяженности и разнообразную по рельефу береговую линию морей и океанов, в том числе и для России.

При этом как одно из направлений важное значение приобретает использование высокоточной топографической лазерной съемки мелководных участков подходов к портам судов класса «река-море» в целях создания инфраструктуры на российском арктическом побережье для проводки торговых международных морских караванов по Севморпути.

Учитывая интенсивное развитие методов воздушного лазерного сканирования, весьма актуальным для топографического картографирования, создания ЕЭКО и кадастра с использованием БВС является создание экономичного отечественного лазерного сканера (аналога зарубежных типа Riegl VUX-240) с весом не более 4 кг и диапазоном рабочих высот 150–3000 м.

Ввиду существенных отличий методов фотограмметрической обработки снимков и результатов ВЛС в виде облака ТЛЮ следует предусмотреть разработку учебных программ или курсов повышения квалификации в профильных отраслевых ВУЗах и колледжах с целью подготовки квалифицированных специалистов в области обработки материалов ЛС.

Нуждаются в нормативном регулировании и технической стандартизации и технологии получения, обработки и использования материалов воздушного и мобильного лазерного сканирования при решении практических задач.

При планировании использования для аэросъемки БВС следует также не упускать из виду тот факт, что в соответствии с действующим законодательством беспилотным воздушным судам не обеспечено равноправное использование воздушного пространства по отношению к пилотируемым. В решении этой проблемы Ассоциацией АЭРОНЕКСТ в Минтрансе необходима соответствующая поддержка со стороны ведомств, активно использующих результаты аэросъемки с БВС.

Увеличение назначенного ресурса (срока безаварийной эксплуатации) БВС – одна из важнейших задач, которую надо решать разработчикам БВС. Это позволит выполнять страхование всего дорогостоящего аэросъемочного комплекса с разумными страховыми взносами, от которого страховые компании в настоящее время отказываются.

Эффективность использования результатов ЛС будет тем выше, чем чаще будут использоваться его материалы государственными органами и частными потребителями. В этих целях целесообразно создание государственной базы метаданных ЛС (например, в Федеральном фонде пространственных данных Росреестра), а с ее развитием и популяризацией (в том числе, путем законодательных мероприятий) в дальнейшем – государственного банка ТЛЮ, как это делается в США [1], Финляндии и Франции [5]. Государственный банк ТЛЮ обеспечит хранение пространственной информации о территории или объекте, которая может периодически актуализироваться с целью мониторинга происходящих во времени изменений.

Заключение

Результаты выполненного исследования и выработанные с их учетом рекомендации должны послужить основой для дальнейших исследований и разработок, направленных на формирование технологических вариантов экономически целесообразного использования материалов лазерного сканирования в области топографического картографирования, кадастра и получения трехмерных моделей местности и объектов, организации и выполнения экспериментальных работ с проведением хронометражных наблюдений, анализом временных и стоимостных затрат по использованию систем лазерного сканирования в целях крупномасштабного картографирования, кадастра, получения пространственной информации для ГИС различного назначения и подготовки проектов, соответствующих нормативно-технических документов.

Литература

1. Алексеев Н.Н. Применение технологии лазерного сканирования в различных отраслях и на различных этапах жизненного цикла объектов / Н.Н. Алексеев // Вестник МГСУ. – 2016. – № 2. – С. 62–73.
2. Олейникова Л.А. Обеспеченность нормативной документацией проведения воздушно-лазерного сканирования для кадастровых работ / Л.А. Олейникова, А.Ю. Глушкова // Научные труды КубГТУ. – 2017 – № 4. – С. 260–264.
3. Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов // (режим доступа: <http://kadastr.org/conf/2015/pub/kadastr/sovrem-tehnologii-v-kadastr-objektov-nedv.htm>) дата обращения: 03.10.2021.

4. Многоцелевое использование воздушного лазерного сканирования. Ценообразование. Нормирование // (режим доступа: <http://www.geoinfo.ru/includes/periodics/Regulations/2016/0306/000011418/detail.shtml>) дата обращения: 12.10.2021.
5. Егоров А.В., Ядрихинская Ю.С. Применение данных воздушного лазерного сканирования при картографировании городов // Материалы международной научно-технической конференции «Цифровая реальность: космические и пространственные данные, технологии обработки». – Иркутск: 2021. – С. 25–26.
6. Петухов М.И. Технологии цифровой реальности Гексагон // Материалы международной научно-технической конференции «Цифровая реальность: космические и пространственные данные, технологии обработки». – Иркутск: 2021. – С. 59.
7. Вопросы и ответы с Кристофером Фишером, Архив Земли. Автор: Вим ван Веген, 12 августа 2021 г. // (режим доступа: <https://www.gim-international.com/content/article/creating-a-digital-twin-of-the-earth>) дата обращения: 01.10.2021.
8. Integrating UAV-based Lidar and Photogrammetry // (режим доступа: <https://www.gim-international.com/content/article/integrating-uav-based-lidar-and-photogrammetry>) дата обращения: 14.09.2021.
9. Morales, A.C., Paez, D., and Arango, C. Multi-criteria analysis of UAVs regulations in 6 countries using the analytical hierarchical process and expert knowledge // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-1 / W4. – P. 175–181.
10. Eric Andelin. Closing in on 500 Authorizations, Commercial UAS Operations Are Starting to Take Off // LIDAR Magazine. – 2015. – Iss.5, vol. 5. – P. 6–8.
11. James Wilder Young (Jamie). Should I Stay, or Should I Go? Manned LIDAR versus Drone LIDAR // LIDAR Magazine. – 2017. – Iss. 7, vol. 8. – P. 4–5.
12. Бабашкин Н.М. Сравнение эффективности аэрофототопографической съемки с использованием беспилотных и пилотируемых авиационных систем / Н.М. Бабашкин, С.А. Кадничанский, С.С. Нехин // Геопрофи. – 2017. – № 1. – С. 14–19.
13. He G.B. and Li L.L. Research and application of lidar technology in cadastral surveying and mapping // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B1-2020. – P. 33–37.
14. Король В.В., Мельников А.В. Анализ применения 3D-кадастра за рубежом // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сборник материалов 15-ой Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, 29–30 октября 2019 г., Минск – Тула – Донецк: в 4 т. – Минск: БНТУ, 2019. – Т. 2. – С. 392–397.
15. Герасимова С.Г. Перспективы создания 3D кадастра в России / С.Г. Герасимова, М.Б. Ибрагимов, М.В. Петров // Геопрофи. – 2013. – № 3. – С. 5–8.
16. Jennifer M. Wozencraft. Mapping Coastal California // LIDAR Magazine. – 2021. – Iss. 11, vol. 2. – P. 3–7.
17. Jennifer M. Wozencraft. Addressing Dire Coastal Mapping Needs on The Last Frontier // LIDAR Magazine. – 2020. – Iss. 10, vol. 2. – P. 5–9.

References

1. Alekseenko N.N. Primenenie tekhnologii lazernogo skanirvaniya v razlichnyh otraslyah i na razlichnyh etapah zhiznennogo cikla ob'ektov / N.N. Alekseenko // Vestnik MGSU. – 2016. – № 2. – С. 62–73.
2. Olejnikova L.A. Obespechennost' normativnoj dokumentaciej provedeniya vozdušno-lazernogo skanirvaniya dlya kadastryh rabot / L.A. Olejnikova, A.YU. Glushkova // Nauchnye trudy KubGTU. – 2017 – № 4. – С. 260–264.
3. Kadastr nedvizhimosti i monitoring prirodnyh resursov // (rezhim dostupa: <http://kadastr.org/conf/2015/pub/kadastr/sovrem-tehnologii-v-kadastr-objektov-nedv.htm>) data obrashcheniya: 03.10.2021.
4. Mnogocel'evoye ispol'zovanie vozdušnogo lazernogo skanirvaniya. Cenoobrazovanie. Normirovanie // (rezhim dostupa: <http://www.geoinfo.ru/includes/periodics/Regulations/2016/0306/000011418/detail.shtml>) data obrashcheniya: 12.10.2021.
5. Egorov A.V., YAdrihinskaya YU.S. Primenenie dannyh vozdušnogo lazernogo skanirvaniya pri kartografirovanii gorodov // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii «Cifrovaya real'nost': kosmicheskie i prostranstvennyye dannyye, tekhnologii obrabotki». – Irkutsk: 2021. – С. 25–26.

6. Petuhov M.I. Tekhnologii cifrovoj real'nosti Geksagon // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Cifrovaya real'nost': kosmicheskie i prostranstvennye dannye, tekhnologii obrabotki». – Irkutsk: 2021. – S. 59.
7. Voprosy i otvety s Kristoferom Fisherom, Arhiv Zemli. Avtor: Vim van Vegen, 12 avgusta 2021 g. // (rezhim dostupa: <https://www.gim-international.com/content/article/creating-a-digital-twin-of-the-earth>) data obrashcheniya: 01.10.2021.
8. Integrating UAV-based Lidar and Photogrammetry // (rezhim dostupa: <https://www.gim-international.com/content/article/integrating-uav-based-lidar-and-photogrammetry>) data obrashcheniya: 14.09.2021.
9. Morales, A.C., Paez, D., and Arango, C. Multi-criteria analysis of UAVs regulations in 6 countries using the analytical hierarchical process and expert knowledge // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-1 / W4. – S. 175–181.
10. Eric Andelin. Closing in on 500 Authorizations, Commercial UAS Operations Are Starting to Take Off // LIDAR Magazine. – 2015. – Iss.5, vol. 5. – P. 6–8.
11. James Wilder Young (Jamie). Should I Stay, or Should I Go? Manned LIDAR versus Drone LIDAR // LIDAR Magazine. – 2017. – Iss. 7, vol. 8. – P. 4–5.
12. Babashkin N.M. Sravnenie effektivnosti aerofototopograficheskoy s'emki s ispol'zovaniem bespilotnyh i pilotiruemyh aviacionnyh sistem / N.M. Babashkin, S.A. Kadnichanskij, S.S. Nekhin // Geoprofi. – 2017. – № 1. – S. 14–19.
13. He G.B. and Li L.L. Research and application of lidar technology in cadastral surveying and mapping // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B1-2020. – S. 33–37.
14. Korol' V.V., Mel'nikov A.V. Analiz primeneniya 3D-kadastra za rubezhom // Social'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki: sbornik materialov 15-oj Mezhdunarodnoj konferencii po problemam gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki, 29–30 oktyabrya 2019 g., Minsk – Tula – Doneck: v 4 t. – Minsk: BNTU, 2019. – T. 2. – S. 392–397.
15. Gerasimova S.G. Perspektivy sozdaniya 3D kadastra v Rossii / S.G. Gerasimova, M.B. Ibragimov, M.V. Petrov // Geoprofi. – 2013. – № 3. – S. 5–8.
16. Jennifer M. Wozencraft. Mapping Coastal California // LIDAR Magazine. – 2021. – Iss. 11, vol. 2. – S. 3–7.
17. Jennifer M. Wozencraft. Addressing Dire Coastal Mapping Needs on The Last Frontier // LIDAR Magazine. – 2020. – Iss. 10, vol. 2. – S. 5–9.

Я.Б. Легостаева¹, А.И. Журавлев¹, В.Ф. Попов², О.В. Шадринова¹, Д.С. Ноев²

¹ Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Россия

² СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ НАРУШЕННЫХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫМИ РАБОТАМИ ЗЕМЕЛЬ ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Аннотация. Западная Якутия славится своими недровыми богатствами. Трудно переоценить роль геологов-разведчиков разных поколений, внесших свой вклад в его изучение. Сегодня в Западной Якутии наиболее интенсивно развиваются алмазодобывающая и нефтегазовая промышленность. Добычу полезного ископаемого предваряют региональный, поисковый и разведочный стадии геологоразведочных работ. При этом современная система экологического нормирования, используемая при оценках влияния геологоразведочных работ на окружающую среду, недостаточна и несовершенна, особенно для масштабных геологоразведочных работ на нефть и газ. Требуется разработка специальных природоохранных нормативов воздействия на окружающую среду при реализации геологических проектов с учетом различных географо-климатических и горно-геологических условий, на основе изучения эколого-геохимических факторов и оценке устойчивости компонентов ландшафта конкретной территории к техногенному воздействию.

Проведены исследования по оценке геоэкологической безопасности геологоразведочных работ на территории Западной Якутии. Составлен реестр нарушенных участков, выявлены и рассчитаны площади нарушенных вследствие геологоразведочных работ земель. Проведена адаптация методики дешифрирования космических снимков высокого разрешения для мелкомасштабных линейных объектов. Выявлена масштабность геологоразведочного техногенеза, которая имеет значительную региональную распространенность, при этом имеется перспектива развития на всю территорию Западной Якутии, включая шельф моря Лаптевых. Это будут сотни тысяч километров просек, миллион квадратных километров, превращенных в сеть геофизических профилей, шириной порядка 10 м. Следует отметить, что последствия такого техногенеза сегодня не известны. Как будет реагировать криолитозона и подземная и поверхностная гидросфера, какова будет реакция газогидратов, заключенных в недрах? Такой масштаб работ уже сегодня может влиять на климатические процессы регионального масштаба, возможно, они в какой-то мере виноваты в засушливых годах, идущих один за другим в Центральной Якутии. Выполненная работа позволяет осознать масштаб техногенного воздействия, искать пути решения, формировать линию «зеленой» геологоразведки в целях сохранения окружающей нас среды.

ЛЕГОСТАЕВА Яна Борисовна – к.б.н., в.н.с., Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН. E-mail: ylego@mail.com

LEGOSTAEVA Yana Borisovna – Candidate of Biological Sciences, Leading researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. E-mail: ylego@mail.com

ЖУРАВЛЕВ Анатолий Иванович – м.н.с., Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН. E-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

ZHURAVLEV Anatoly Ivanovich – Junior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. E-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

ПОПОВ Владимир Федорович – доцент, Геологоразведочный факультет СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: pvf_grf@rambler.ru

POPOV Vladimir Fedorovich – Associate Professor, Faculty of Geology and Survey, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: pvf_grf@rambler.ru

ШАДРИНОВА Олеся Владимировна – м.н.с., Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН. E-mail: ovshadrinova@gmail.com

SHADRINOVA Olesya Vladimirovna – Junior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. E-mail: ovshadrinova@gmail.com

НОЕВ Даниил Степанович – студент, Геологоразведочный факультет СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: daniilnoev@mail.ru

NOEV Daniil Stepanovich – student, Faculty of Geology and Survey, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: daniilnoev@mail.ru

Ключевые слова: геологоразведочные работы, Западная Якутия, дистанционное зондирование, ГИС-технологии, просеки, сейсмический профиль, охрана окружающей среды, геоэкология, инвентаризация, техногенез.

Ya.B. Legostaeva¹, A.I. Zhuravlev¹, V.F. Popov², O.V. Shadrinova¹, D.S. Noev²

¹ Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

² M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

INVENTORY OF THE LANDS OF WESTERN YAKUTIA DISTURBED BY GEOLOGICAL EXPLORATION ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA

Abstract. Western Yakutia is famous for its mineral wealth. It is difficult to overestimate the role of exploration geologists of different generations who have contributed to its study. Today the diamond mining and oil and gas industries are developing most intensively in Western Yakutia. The extraction of minerals is preceded by the regional, prospecting and exploration stages of geological exploration. At the same time, the modern system of environmental regulation used in assessing the impact of geological exploration on the environment is insufficient and imperfect, especially for large-scale exploration for oil and gas. It is required to develop special environmental standards for environmental impact during the implementation of geological projects, taking into account various geographic, climatic and mining and geological conditions, based on the study of environmental and geochemical factors and assessment of the stability of landscape components of a particular territory to man-made impact. For the territory of Western Yakutia, studies were carried out to assess the geoecological safety of geological exploration. A register of disturbed sites was compiled; the areas of lands disturbed due to geological exploration were identified and calculated. The adaptation of the high-resolution satellite imagery interpretation technique for small-scale linear objects was carried out. The scale of geological prospecting technogenesis was revealed, which has a significant regional scale, while it has the prospect of spreading to the entire territory of Western Yakutia, including the shelf of the Laptev Sea. It will be hundreds of thousands of kilometers of clearings, a million square kilometers transformed into a network of geophysical profiles about 10 m wide. It should be noted that the consequences of such technogenesis are not known today, how the cryolithozone and the underground and surface hydrosphere will react, what will be the reaction of gas hydrates trapped in the bowels? Such a scale of work today can already influence the climatic processes of a regional scale, it is possible that they are to some extent to blame for the dry years following one after another in Central Yakutia. The work performed allows us to understand the scale of antropogenic impact, to look for ways to solve it, to form green exploration for the protection of our environment.

Keywords: geological exploration, Western Yakutia, remote sensing, GIS technologies, clearing, forests, seismic profiles, environmental protection, geoecology, inventory, technogenesis.

Введение

Роль Западной Якутии в народном хозяйстве страны связана с колоссальными богатствами недр, в наше время, это, прежде всего, алмазы, природный газ и нефть. История ее геологического изучения берет свое начало с первых сообщений землепроходцев в XVI-XVII веках. Впоследствии до начала XX века здесь отметились экспедиции В. Прончищева, Д. и Х. Лаптевых, В.А. Обручева, Р.К. Маака, А.Ф. Миддендорфа, А.Л. Чекановского и многих других исследователей. В первой половине XX века здесь работали десятки экспедиций, включая те, во главе которых стояли такие крупные ученые, как В.А. Обручев, С.В. Обручев, А.А. Борисяк, С.С. Смирнов, Ю.К. Дзевановский, В.С. Соболев, Б.Н. Рожков [1-3]. Их работы позволили увидеть перспективы территории на алмазы, нефть и газ. После окончания Великой Отечественной войны в Западной Якутии начинаются широкие, системные и планомерные исследования. Это привело к открытию в 1954-1955 годах коренных месторождений алмазов – кимберлитовых трубок «Мир» и «Удачная». А в 1956 году из скважины в 20 км от устья реки Вилюй ударил мощный фонтан природного газа – обнаружено Усть-Вилюйское месторождение газа как предвестника открытия нефтегазовых провинций Западной Якутии [3]. Сегодня богатства недр такой большой территории исследованы далеко не полностью. Нас, несомненно, еще ожидают

великие геологические открытия, которые могут полностью изменить хозяйственно-экономическую ситуацию в регионе.

Впервые метод дистанционного зондирования в Западной Якутии был осуществлен в 1951 году [4]. Интересен факт, что начало интенсивного освоения Западной Якутии совпало с началом космической эры – в 1957 году был запущен первый спутник Земли и в этот же год стартовала добыча алмазов с кимберлитовой трубки «Мир». Конечно, со временем для целей дистанционного зондирования стали также использовать фотографии с космических спутников. Сегодня именно они широко используются при исследованиях территории для различных целей: поисково-съёмочных, землеустроительных, хозяйственных, мониторинговых и т.д. [4-6]. В последние годы стали общедоступны космические снимки через сеть Интернет, такие как Landsat, Yandex, GoogleEarth и другие. При этом следует отметить, что качество, детальность и удобство использования их растут. На снимках по прямым дешифровочным признакам хорошо фиксируются площадные, линейные и даже точечные объекты техногенеза: инфраструктура населённых пунктов и промышленные объекты, карьеры и отвалы, хвостохранилища и водохранилища, дороги и просеки, буровые площадки и т.д. [7-8]. Они стали широко использоваться в увязке с ГИС-технологиями, что даёт возможность проводить анализ территории и оценивать её геоэкологическое состояние.

Цель исследования: инвентаризация нарушенных геологоразведочными работами земель Западно-Якутского региона по данным дистанционного зондирования для оценки её масштабов.

Задачи:

- дешифровать техногенное воздействие геологоразведочных работ на космических снимках высокого разрешения;
- с помощью ГИС-инструментов выделить 1) границы лицензионных участков на полезные ископаемые (ПИ) – «алмазы» и «углеводороды»; 2) выделить объекты техногенеза, оценить их линейные и площадные размеры;
- оценить возможности дистанционного зондирования и ГИС-технологии для инвентаризации нарушенных геологоразведочными работами земель Западно-Якутского региона.

Материалы и методы исследования

Работа выполнена с помощью облачной картографической ГИС-платформы ArcGIS-online для территории Западной Якутии и программного обеспечения ESRI ArcGIS в отношении лицензионных участков на алмазы и углеводороды (ПИ «Углеводороды» и ПИ «Алмазы»). На космических снимках высокого разрешения визуально найдены, дешифрованы и отмечены площади со следами техногенного линейного воздействия: просеки, дороги и сейсмопрофиля (это хорошо видно на увеличенном фрагменте участка на рис. 2).

Затем средствами модуля ArcMap каждая подобная структура была вручную обрисована в векторный линейный объект – красной линией. В конечном итоге для территории Западной Якутии получено 3632 линейных объектов соответствующих различным нарушениям на поверхности земли. Использование инструмента «Calculate geometry» в атрибутивной таблице позволило вычислить длины каждого линейного объекта. Далее, экспортировав полученную таблицу в «Microsoft Excel», выполнили сложение всех длин линейных объектов, ооконтурировали и вычислили площади, подвергнутые техногенному воздействию.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время нет общепризнанной методики проведения геоэкологической оценки территории. Существует большое количество различных критериев, признаков, показателей, индексов и коэффициентов, выбор которых зависит от поставленной цели исследования. Бытует мнение, что негативное воздействие геологоразведочных поисковых работ на окружающую среду является незначительным, точечным. Однако сегодня это не так. Во многом степень воздействия зависит от вида полезного ископаемого и стадии геологоразведочных работ, которые подразделяются на региональный, поисковый и разведочный этапы. Они предшествуют процессу добычи полезного ископаемого.

Уничтожение растительного покрова и органогенного горизонта почвы влечёт за собой нарушение мерзлотно-гидрологического режима, что может привести к развитию термокарста,

солифлюкции, пучения, формированию таликовых зон. Образуются бугорковато-трещиноватый микрорельеф, не редко на поверхности появляется соляная корочка [9].

Анализ материалов космических снимков показал, что на территории Западной Якутии наибольшие площади, подвергнутые геологоразведочному техногенезу, формируются при поисковых работах на углеводороды. Связано это, прежде всего, с технологией сейсмологической разведки, являющейся наиболее эффективной при поиске месторождений нефти и природного газа. Данный геофизический метод основан на изучении искусственно возбужденных упругих волн, характеристики распространения которых зависят от свойств геологической среды.

Для проезда техники и установки кабелей и датчиков в лесном массиве прорубаются сети просек и сейсмопрофилей, которые легко дешифрируются на космоснимках. Исследуемые территории имеют серьезный региональный масштаб, несомненно, что они превышают площади открываемых месторождений углеводородов (рис. 1).

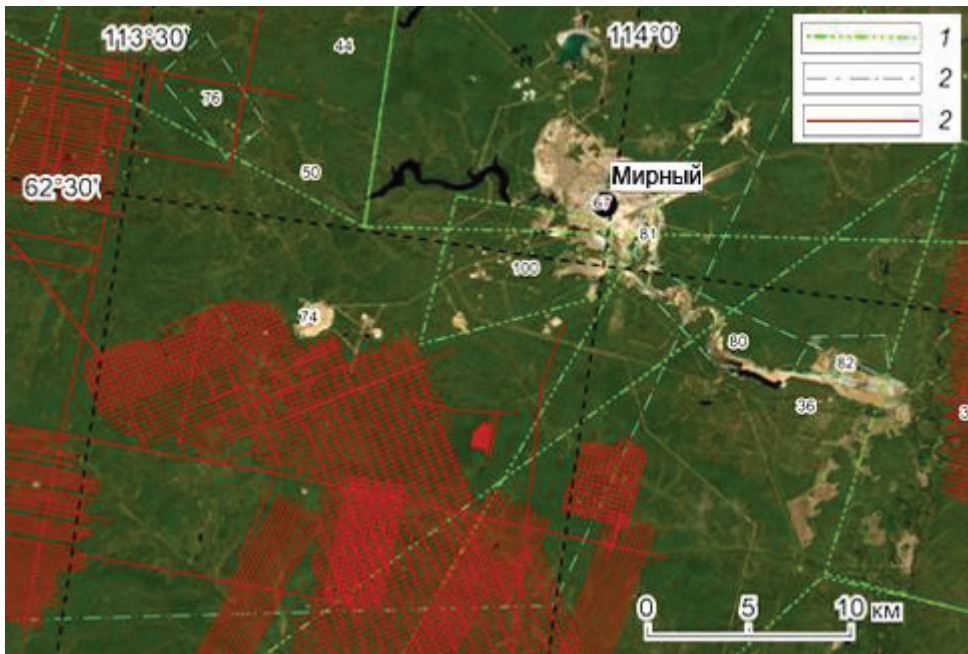


Рис. 1. Космический снимок с указанием границ лицензионных участков и установленным техногенным воздействием на природу: 1 – границы лицензионных участков с ПИ «Углеводороды»; 2 – границы лицензионных участков с ПИ «Алмазы»; 3 – линейные векторные объекты, отражающие техногенные нарушения на земной поверхности (просеки, расчистки)

Общая длина всех линейных объектов на территории исследования составила 84 783,32 км. С учетом того, что средняя ширина просек и профилей равна 10 м, можно констатировать, что общая площадь нарушенного почвенно-растительного покрова составляет 847,3 км².

Объединенная площадь лицензионных участков с ПИ «Углеводороды» (зеленые контуры) равна 250 843 км² (рис. 2). Площади, подвергнутые техногенезу (желтые квадраты) – 12 126 км². Таким образом, в результате ГРП подвергнуто воздействию порядка 7 % от общей площади нарушенных ландшафтов.

Геологоразведочные работы проводятся на больших площадях, которые существенно превышают площади открываемых в результате месторождений, вследствие чего трансформации и загрязнению подвергаются большие территории, что особенно справедливо для крупных опосредуемых перспективных территорий [9-10].

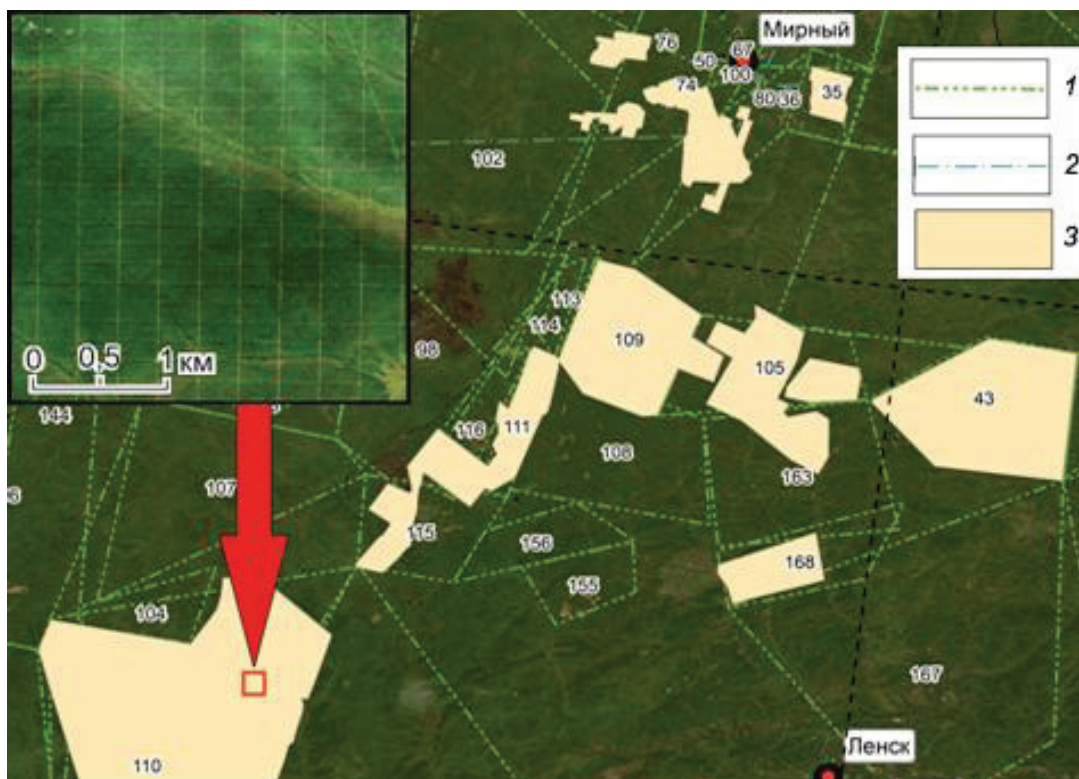


Рис. 2. Фрагмент исследуемой территории Западной Якутии с указанием границ лицензионных участков, на которых проходят поисково-разведочные работы и площадей с установленным по космическим снимкам техногенным воздействием на природу: 1 – границы лицензионных участков с ПИ «Углеводороды»; 2 – границы лицензионных участков с ПИ «Алмазы»; 3 – площади с установленным по космическим снимкам техногенным воздействием на природу

В 2021 году технология «Зеленая сейсмика», разработанная «Газпром нефтью», признана одним из лучших экологических проектов России и выиграла Национальную экологическую премию имени В. И. Вернадского. Эта технология апробирована с 2013 года и позволяет уменьшить вырубки на 40-60 %. Она несколько лет применяется в Ханты-Мансийском автономном округе, Ямало-Ненецком автономном округе и Томской области. В основе технологии бескабельная телеметрическая система сбора данных и легкая вездеходная техника, которая не требует широких просек [11-12]. В современном мире в связи с ростом глобальных экологических угроз становится популярным тренд ответственного инвестирования, поощряющим соответствие бизнеса и политики принципам устойчивого развития – ESG (Environmental, Social, Governance) [11]. В этом направлении также должна двигаться и геологоразведка в Якутии.

Закключение

Во многих документах, в том числе в первой редакции Закона о недрах, сказано, что «на этапе регионального геологического изучения недр геолог практически не наносит вреда окружающей среде». Нашими работами и исследованиями в других регионах на сегодняшний день доказано, что воздействие на все компоненты экосистемы от проведения геологоразведочных работ на всех этапах и стадиях разведки и поиска оказывается масштабное и долговременное

В целом, необходимо отметить, что применение космических технологий, масштаб съемки позволяет использовать материалы дистанционного зондирования Земли в качестве метода объективного контроля геоэкологического состояния земель, нарушенных в ходе геологической разведки и провести их инвентаризацию.

Литература

1. 50 лет геологической службы Республики Саха (Якутия). Сборник. – М.: РосГео, 2007. – 382 с.
2. Ягнышев Б.С., Ягнышева Т.А., Зинчук М.Н., Легостаева Я.Б. Экология Западной Якутии (геохимия геосистем: состояние и проблемы). – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. – 432 с.
3. Маршинцев В.К., Гадиятов В.Г. Богатства недр Якутии: полезные ископаемые, минерально-сырьевая. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020. – 320 с.
4. Серокуров Ю.Н. Дистанционный экологический мониторинг района Удачинского ГОКа (Якутия) / Ю.Н. Серокуров, А.М. Люхин, И.В. Калмыков // Записки Горного института. – 2001. – том 149. – С.174-176.
5. Зеньков И.В. Космические технологии в оценке экологии нарушенных земель на месторождениях алмазов в России / И.В. Зеньков, А.Б. Федоров, П.М. Кондрашов, А.С. Морин, В.Н. Вокин, Е.В. Кирюшина, Ж.В. Миронова, Т.А. Веретеннова // Экология и промышленность России. – 2020. – том 24. – № 1. – С. 34-39.
6. Зеньков И.В. Результаты дистанционного мониторинга экологии горнопромышленных ландшафтов на территории Удачинского и Мирнинского горно-обогатительных комбинатов / И.В. Зеньков, А.С. Морин, В.Н. Вокин, Е.В. Кирюшина, Ж.В. Миронова, П.М. Кондрашов, А.Б. Федоров, Т.А. Веретеннова // Экология и промышленность России. – 2020. – том 24. – № 1. – С. 40-45.
7. Google Earth (режим доступа: <https://www.google.com/earth/>) дата обращения: 3.06.2021.
8. EarthExplorer (режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/>) дата обращения: 3.06.2021.
9. Legostaeva Ya., Gololobova A., Popov V. Geochemical Risks of Diamond Mining in Siberia // Environmental sciences proceedings. – 2021. – Vol. 5, Iss. 1, 4. doi: 10.3390/IECG2020-08907.
10. Яковлева Т.П. Геоэкологические аспекты разведочных работ на примере месторождения нефти и газа в Восточной Сибири / Т.П. Яковлева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 2. – С. 411-416.
11. В зеленом тренде. Экологические проекты как часть ESG-стратегии // Сибирская нефть. – 2021. – № 4/181. – С.12-15.
12. Михеев С.И. Новые возможности сейсморазведки в связи с разработкой бескабельных систем регистрации информации / С.И. Михеев, И.М. Кузнецов, В.А. Селезнёв // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2013. – № 75. – С. 39-45.

References

1. 50 let geologicheskoy sluzhby Respubliki Saha (Yakutiya). Sbornik. – M.: RosGeo, 2007. – 382 s.
2. YAgnyshv B.S., YAgnysheva T.A., Zinchuk M.N., Legostaeva YA.B. Ekologiya Zapadnoj YAkutii (geohimiya geosistem: sostoyanie i problemy). – YAkutsk: Izd-vo YANC SO RAN, 2005. – 432 s.
3. Marshincev V.K., Gadiyatov V.G. Bogatstva neдр YAkutii: poleznye iskopaemye, mineral'no-syr'evaya. – Voronezh: Izdatel'skij dom VGU, 2020. – 320 s.
4. Serokurov YU.N. Distancionnyj ekologicheskij monitoring rajona Udachninskogo GOKa (Yakutiya) / YU.N. Serokurov, A.M. Lyuhin, I.V. Kalmykov // Zapiski Gornogo instituta. – 2001. – tom 149. – S.174-176.
5. Zen'kov I.V. Kosmicheskie tekhnologii v ocenke ekologii narushennyh zemel' na mestorozhdeniyah almazov v Rossii / I.V. Zen'kov, A.B. Fedorov, P.M. Kondrashov, A.S. Morin, V.N. Vokin, E.V. Kiryushina, Zh.V. Mironova, T.A. Veretenova // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. – 2020. – tom 24. – № 1. – S. 34-39.
6. Zen'kov I.V. Rezul'taty distancionnogo monitoringa ekologii gornopromyshlennyh landshaftov na territorii Udachninskogo i Mirninskogo gorno-obogatitel'nyh kombinatov / I.V. Zen'kov, A.S. Morin, V.N. Vokin, E.V. Kiryushina, Zh.V. Mironova, P.M. Kondrashov, A.B. Fedorov, T.A. Veretenova // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. – 2020. – tom 24. – № 1. – S. 40-45.
7. Google Earth (rezhim dostupa: <https://www.google.com/earth/>) data obrashcheniya: 3.06.2021.
8. EarthExplorer (rezhim dostupa: <https://earthexplorer.usgs.gov/>) data obrashcheniya: 3.06.2021.
9. Legostaeva Ya., Gololobova A., Popov V. Geochemical Risks of Diamond Mining in Siberia // Environmental sciences proceedings. – 2021. – Vol. 5, Iss. 1, 4. doi: 10.3390/IECG2020-08907.
10. YAkovleva T.P. Geoekologicheskie aspekty razvedochnyh rabot na primere mestorozhdeniya nefi i gaza v Vostochnoj Sibiri / T.P. YAkovleva // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). – 2015. – № 2. – S. 411-416.
11. V zelenom trende. Ekologicheskie proekty kak chast' ESG-strategii // Sibirskaya nef'. – 2021. – № 4/181. – S.12-15.
12. Miheev S.I. Novye vozmozhnosti sejsmorazvedki v svyazi s razrabotkoj beskabel'nyh sistem registracii informacii / S.I. Miheev, I.M. Kuznecov, V.A. Seleznyov // Nedra Povolzh'ya i Prikaspiya. – 2013. – № 75. – S. 39-45.

— ГЕОКРИОЛОГИЯ —

УДК 551.345.1

DOI 10.25587/SVFU.2022.25.1.013

Н.А. Федоров, Н.И. Башарин

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

**АКТИВИЗАЦИЯ ТЕРМОКАРСТА ПОСЛЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ
НА ЯНСКОМ ПЛОСКОГОРЬЕ НА ПРИМЕРЕ
РАЙОНА г. ВЕРХОЯНСКА**

Аннотация. Термокарст является одним из ярких процессов, характеризующих динамику мерзлотных ландшафтов. Он представляет процесс проседания грунта вследствие оттаивания подземного льда. Под воздействием внешних факторов, таких как изменение климата, лесные пожары, вырубki лесов, нашествие шелкопряда и т.п., возникает ускорение процесса деградации многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Так же усугубляет ситуацию высвобождение парниковых газов, заточенные в ММГ, которые, в свою очередь, ускоряют процесс потепления климата. Изучение термокарста позволяет оценить масштабы деградации ММГ и провести количественную оценку влияния на потепление климата.

Рассмотрены проявления термокарстовых процессов на льдонасыщенных грунтах Янского плоскогорья. Приведены климатические условия исследуемого участка, а также обзорные геоморфологические и литологические особенности распространения грунтов на ней. Оценена деградация многолетней мерзлоты под воздействием лесных пожаров. Рассчитано оттаивание подземных льдов на участке «Чогоро» по классификации цифровой модели рельефа с помощью дешифрирования снимков с беспилотных летательных аппаратов. Основными методами работ являются ландшафтно-криоиндикационные и дистанционные. Обработка аэрофотоснимков велась в программных обеспечениях Topodrone, Agisoft metashape и ArcGIS. Приведен пошаговый метод подсчёта объема вытаявшего льда на двух участках. Выявлены темпы деградации мерзлых грунтов для ключевых участков в пределах от 5,2 до 10,5 см/год. Объем вытаявшего льда составил 16364 м³ и 17985 м³.

Сравнительный анализ форм рельефа, полученными с цифровых моделей рельефа по данным аэрофотосъемки выявил хорошую корреляцию с цифровой моделью поверхности по данным космических снимков, что подтвердилось по данным полевых измерений. Объем вытаявшего льда указывает на масштабные высвобождения парниковых газов в атмосферу, ускоряя темпы глобального потепления. Темпы деградации ММГ после лесных пожаров на льдистых грунтах безусловно активизируются или ускоряются.

Ключевые слова: термокарст, подземный лед, мерзлотные ландшафты, мерзлота, расчёт объема льда, дистанционные методы, беспилотные летательные аппараты, просадки грунтов.

N.A. Fedorov, N.I. Basharin

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

**ACTIVATION OF THERMOKARST AFTER FOREST FIRES
ON THE YANSKY PLATEAU: THE CASE OF VERKHOYANSK AREA**

Abstract. Thermokarst is one of the striking processes that characterize the dynamics of permafrost landscapes. It represents the process of soil subsidence due to thawing of underground ice. Under the influence

ФЕДОРОВ Николай Александрович – к.г.н., в.н.с. Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. E-mail: fedorov@mpi.ysn.ru

FEDOROV Nikolay Alexandrovich – Candidate of Geographical Sciences, Leader Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS. E-mail: fedorov@mpi.ysn.ru

БАШАРИН Николай Ильич – м.н.с, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. E-mail: Nikolay_B89@mail.ru

BASHARIN Nikolay Ilyich – Junior researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. E-mail: Nikolay_B89@mail.ru

of external factors, such as climate change, forest fires, deforestation, the invasion of silkworms, etc., there is an acceleration of the process of degradation of permafrost soils. The situation is also aggravated by the release of greenhouse gases trapped in permafrost soils, which, in turn, accelerate the process of climate warming. The study of thermokarst makes it possible to assess the scale of degradation of permafrost and to quantify the impact on climate warming.

Manifestations of thermokarst processes on ice-saturated soils of the Yanskiy plateau are considered. The climatic conditions of the investigated area, as well as survey geomorphological and lithological features of the distribution of soils on it. The degradation of permafrost under the influence of forest fires has been assessed. The thawing of underground ice in the “Chogoro” area was calculated according to the classification of the digital elevation model using the interpretation of images from unmanned aerial vehicles. The main methods of work are landscape cryoindication and remote sensing. Aerial photographs were processed using Topodrone, Agisoft metashape and ArcGIS software. A step-by-step method for calculating the volume of thawed ice in two areas is presented. The rates of degradation of frozen soils for key areas were revealed in the range from 5.2 to 10.5 cm / year. The volume of melted ice was 16364 m³ and 17985 m³.

Comparative analysis of landforms obtained from digital elevation models based on aerial photography data revealed a good correlation with a digital surface model based on satellite imagery data, which was confirmed by field measurements. The amount of ice that has melted indicates large-scale releases of greenhouse gases into the atmosphere, accelerating the rate of global warming. The rate of degradation of permafrost soils after forest fires on icy soils is undoubtedly intensified or accelerated.

Keywords: thermokarst, underground ice, permafrost landscapes, permafrost, ice volume calculation, remote sensing methods, unmanned aerial vehicles, soil subsidence.

Введение

Термокарст является одним из ярких процессов, характеризующих динамику мерзлотных ландшафтов. Он представляет процесс проседания грунта вследствие оттаивания подземного льда. Под воздействием внешних факторов, таких как изменение климата, лесные пожары, вырубки лесов, нашествие шелкопряда и т.п., возникает ускорение процесса деградации многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Так же усугубляет ситуацию высвобождение парниковых газов, заточенные в ММГ, которые, в свою очередь, ускоряют процесс потепления климата. Изучение термокарста позволяет оценить масштабы деградации ММГ и провести количественную оценку влияния на потепление климата.

В настоящее время, по всей Якутии наблюдается активизация термокарста. В условиях потепления климата, деградирует переходный слой к ММГ, защищающий их от избыточного теплопереноса с поверхности в мерзлые грунты, провоцируя проседания в виде типичных для полигонально-жильных льдов – термокарстовых форм рельефа. На территории Республики Саха (Якутия) на протяжении более 30 лет ведутся мониторинговые наблюдения за развитием термокарста [1]. Оценивается влияние на мерзлотные условия растительного покрова, рельефа, увлажнённости, литологического состава грунтов, а также климатических факторов, таких как среднегодовые температуры воздуха и среднемесячные атмосферные осадки.

Изучение термокарстового процесса ведется вплотную с мерзлотно-ландшафтными исследованиями, так как непосредственную роль в развитии данного процесса оказывают природно-территориальные комплексы (ПТК) [2]. Было отмечено, что термокарст проявляется только лишь в пределах развития разновозрастных ледовых комплексов, наиболее широко распространенных на территории Центральной Якутии. Так же научные исследования в основном ведутся непосредственно на территории центральной Якутии [3-4].

За пределами Центральной Якутии широкую известность получил Батагайский провал на Янской плоскогорной провинции в зоне сплошного распространения ММГ с преобладанием горноредколесных природных комплексов [5-7]. В пределах данной провинции, при осмотре участков, пораженных лесными пожарами, были обнаружены уникальные территории в тысячи гектаров с развитием термокарстовых форм рельефа.

Цель статьи – оценка деградации многолетней мерзлоты под воздействием лесных пожаров. Поставленная задача: расчёт оттаивания подземных льдов на участке «Чогоро» с помощью классификации цифровой модели рельефа (ЦМР) с помощью дешифрирования снимков с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Собранный материал включает в себя полевые данные с исследуемого участка методами мерзлотно-ландшафтной съемки, а также общедоступный материал с баз геоданных космических спутников Landsat и Sentinel. В работе использованы климатические данные метеорологической станции Верхоянск.

Исследуемый участок

Верхоянск – один из самых холодных территорий в мире. По данным метеостанции Верхоянск (рис. 1), среднегодовая температура воздуха варьируется в пределах от -17 до -12 °С. Климат на Янском плоскогорье сухой и резко континентальный, с очень холодной зимой и относительно теплым летом.

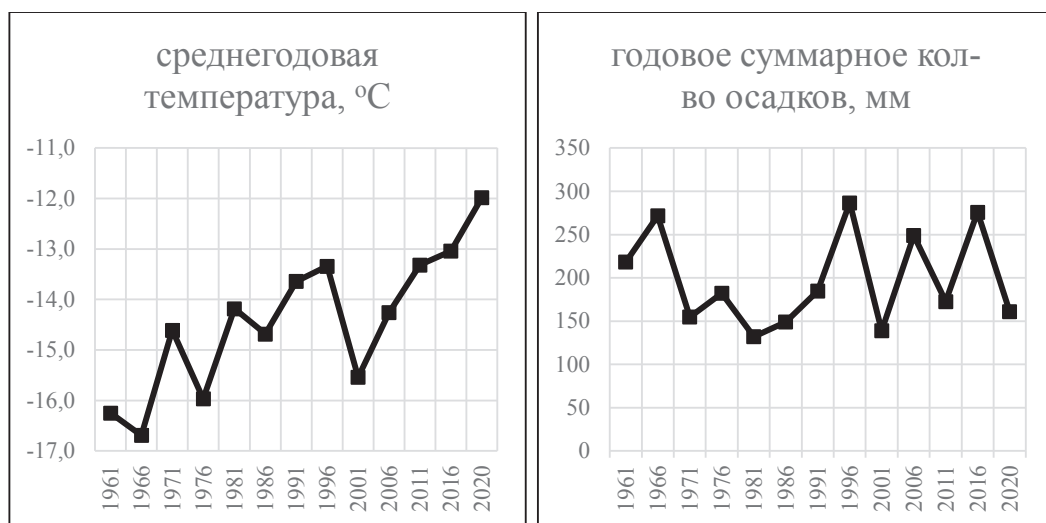


Рис. 1. Климатические данные метеостанции Верхоянск

Геологическое строение этой территории определяется ее положением на западе Верхояно-Колымской складчатой области, где распространены темно-серые терригенные алевролиты и аргиллиты триаса [8]. Те и другие содержат слои песчаников, вместе с ними образуя сложно смятую и прорванную интрузивными породами осадочную толщу. На ней имеется глинистая кора выветривания, местами перекрытая породами неогена. Неоген состоит из глин с галькой и щебнем, галечников, суглинков, супесей, песков (табл. 1). Квартер здесь залегает в виде прерывистого плаща, расположенного на более древних толщах скальных и дисперсных пород.

Таблица 1 – Описание геокриологического разреза участка Чогоро в лесном массиве

Номер слоя	Глубина, м	Краткая характеристика пород
1	0,0-4,6 см	лесная подстилка.
2	4,6-80 см	сезонноталый слой, состоящий из супеси
3	80-100 см	мерзлая толща представлена супесью бурого цвета с зеленоватым оттенком. В интервале 95-100 см слоистая криотекстура, слои льда шириной до 0,5 см. Льдистость 5-10 %.
4	100-110 см	ледогрунт супесчаный. Линзовидная криотекстура. Льдистость 40-50 %.
5	110-135 см	ледогрунт суглинистый. Слоистый, линзовидной криотекстуры. Льдистые прослои до 0,5 см, грунтовые прослои от 3 мм до 10 мм. Льдистость 60 %.
6	135-143 см	лед 90 % (ледогрунт) с массивной криотекстурой.
7	143-157 см	Ледогрунт, льдистость до 80 %. Полосчатость преимущественно горизонтальная. Наблюдаются вертикальные прожилки.

Продолжение табл. 1

8	157-176 см	до 161 см ледогрунт с льдистостью до 60 %, после до 170 см ледогрунт косослоистой криотекстуры. Льдистость до 40 %. Ниже по разрезу наблюдается уменьшение льдистости. До 176 см суглинок мерзлый, массивный.
9	176-197 см	слабольшедистый суглинок, льдистость до 5 %, массивный.
10	197-234 см	слабольшедистый суглинок массивной криотекстуры, льдистость до 5 %. 203-234 см суглинок мерзлый массивной криотекстуры. Имеются включения органических остатков в виде бурых корешков и черных обугленных корешков.
11	234-248 см	слабольшедистый суглинок. Криотекстура косослоистая. Льдистость до 5 %.
12	248-266 см	суглинок мерзлый. Массивной криотекстуры. Включения детрита.
13	266-280 см	суглинок твердомерзлый. По всему интервалу бурые включения лимонита совместно с черным детритом. Цвет суглинка бурый с ржавым оттенком.
14	280-300 см	суглинок мерзлый. Микролинзовидная криотекстура. Продолжаются включения лимонита и детрита.
15	300-322 см	от 300 до 306 см твердомерзлый суглинок массивной криотекстуры. От 306 до 312 см ледогрунт льдистостью до 50 %. От 312 до 322 см массивный твердомерзлый суглинок бурого цвета с желтоватым оттенком. Наблюдаются включения органических остатков.
16	322-338 см	ледогрунт мощностью (???) 30 %. Вмещающим грунтом является суглинок с ржавым оттенком. По мере углубления увеличивается льдистость.
17	338-356 см	от 338 до 345 см льдистый суглинок с льдистостью 10-15 % с гнездовидной криотекстурой. От 345 до 356 см твердомерзлый суглинок с массивной криотекстурой, имеется микрослоистость с небольшим наклоном.
18	356-363 см	сильнольдистый суглинок с косослоистой текстурой. Льдистость 20-30 %.

Уплогненные вершины – вершины плоскогорья – являются участками сильнотрещиноватых пород. Перекрываются они элювиальным щебнем с корками и гнездами льда. Среди такого элювия имеются отдельные (обычно гранитные) скалы – кигилиахи, возвышающиеся над щебнем на 1–10 м и более [9]. Эти скалы свидетельствуют, что выветривание здесь значительно медленнее разрушает интрузивные породы, чем вмещающие их осадочные образования. Склоны гор средней крутизны и пологие, часто осложняются площадками криопланационных террас. Последние секут складки скального основания, в которое они врезаны, и представляют собой реликтовые формы в лесном поясе Янского плоскогорья.

Подгорная равнина (преобладающие абсолютные высоты 200–250 м) отличается неглубоким залеганием пород неогена. Эта увалистая равнина занимает в геоморфологическом плане промежуточное место между областью речных террас и областью горных склонов (рис. 2). Отдельные овраги расчлениают поверхность подгорной равнины. Иногда на ней находятся аласы – сточные и бессточные термокарстовые котловины с озерами и болотами.

Аласы на подгорной равнине и уплогненность вершин гор в области складчатого триаса и смежные с ними поверхности выравнивания, неактивные площадки криопланационных террас и полигональные формы на склонах гор определяют особенности рельефа этой территории (рис. 3). Их можно объяснить ее положением в одной из наиболее холодных частей Восточной Сибири, где формирование криолитозоны началось еще в позднем плиоцене [10] и происходило, судя по всему, под влиянием ледников хр. Черского и Верхоянского хребта. Влияние этих ледников, вероятно, усиливалось, когда от них поступали значительные объемы ледниковых вод. Однако процессы стока и роль таких вод в развитии криолитозоны Янского плоскогорья пока что слабо изучены.

В одном из аласов расположен исследуемый участок (рис. 4). Растительность угнетена масштабными лесными пожарами, проходившими в 2002 и 2013 годах. Вся территория является горельником, полностью восстановившийся после пожаров. Лес представлен лиственницей Каяндера с подростом тощей и кустарниковой березки. Напочвенный покров лишайниково-мохово-брусничный. На лугу растительность представлена разнотравно-злаковыми ассоциациями с ерниками, а также молодой лиственницей от 5 до 13 лет. Грунты нарушены термокарстовыми формами рельефа и сильно увлажнены.

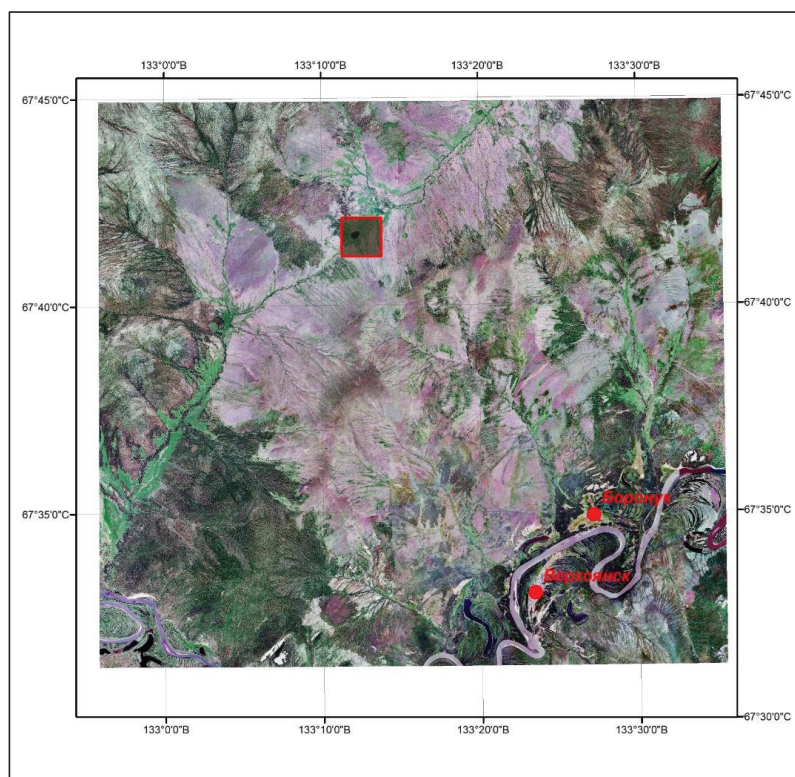


Рис. 2. Территория исследуемого участка. В красной рамке – участок «Чогоро»

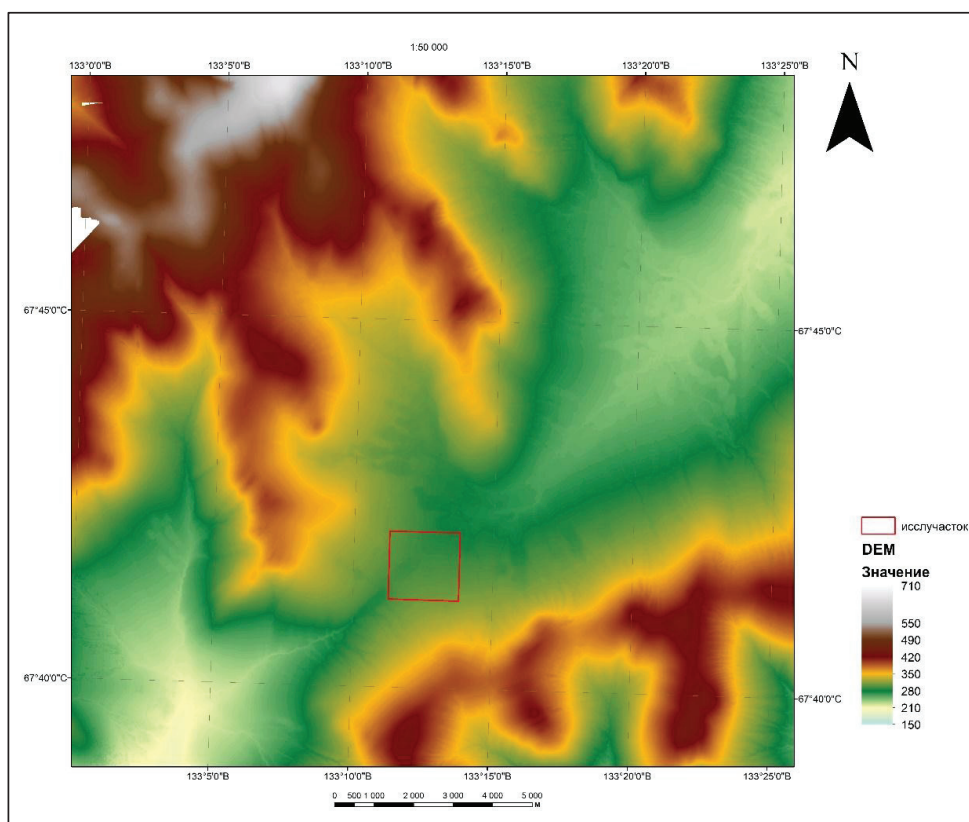


Рис. 3. Формы рельефа участка «Чогоро» по данным ESRI ArcticDEM

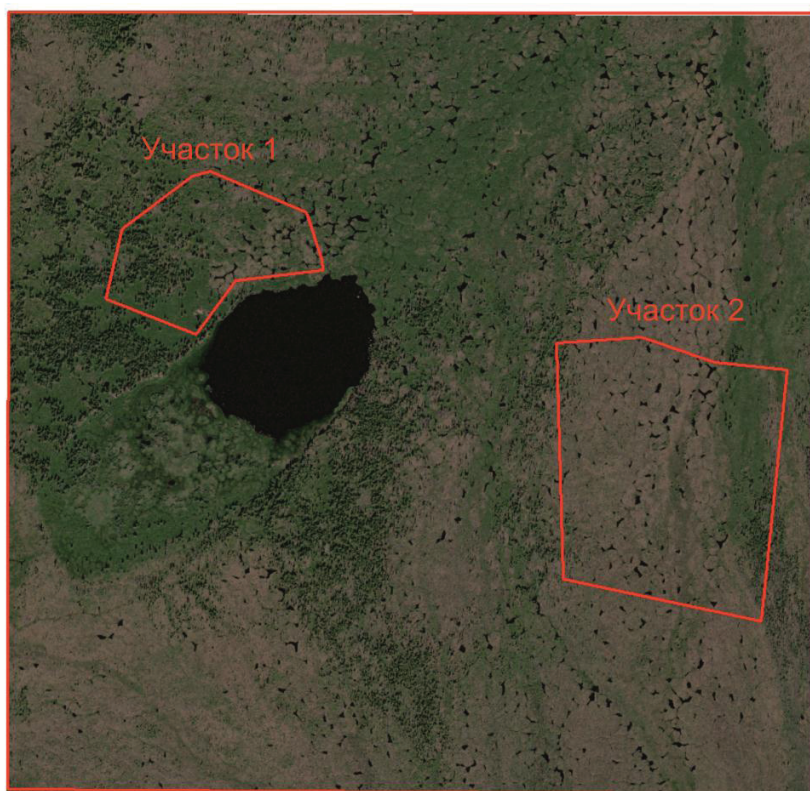


Рис. 4. Участок «Чогоро». Красными рамками выделены контрольные участки

Материалы и методы исследования

Основными методами работ являются ландшафтно-криоиндикационные и дистанционные. Полевые исследования проводились в сентябре 2021 года. Были пробурены две скважины в лесном массиве и на разнотравно-злаковом лугу в центре полигонов термокарстовых образований. Было произведено описание керна.

Установлены четырехканальные логгеры на глубину до 3,2 м для дальнейшего наблюдения за температурными режимами ПТК. Помимо всего, была проведена нивелирная съемка, в качестве заверяющего метода для моделирования формы рельефа. Ортофотопланы ключевых участков были сняты с помощью БПЛА (DJI Phantom 4 Pro) с дополнительными геодезическими модулями от «Торподrone», для более точной и детальной пространственной привязки точек камер при обработке аэрофотоснимков. С помощью данных методов мы добились пространственного разрешения в 3 см/пикс с высоты полета 150 м. Так же при построении карты высот по данным материалам в программной среде Agisoft Metashape была проведена классификация облака точек с фильтрацией земной поверхности, чтобы построить ЦМР. Добившись максимальной точности и детальности, весь материал был перенесен в программную среду ArcGIS где был произведен пространственный анализ форм рельефа.

Согласно поставленной задаче, а именно расчёту оттаивания подземного льда, мы придерживались следующего принципа: поверхностные просадки отражают объем вытаявшего льда в грунте. Это означает, что первоначальная поверхность, а именно ее относительная высота, была распространена равномерно на всю площадь исследуемой территории, без сети просадок по полигонально-жильным льдам. Чтобы рассчитать объем вытаявшего льда, мы воспользовались инструментом насыпи/выемки в Spatial analyst в ArcMap.

Порядок расчёта объема льда проводится в следующей последовательности (рис. 5): 1) Создать точки высот по наивысшим точкам территории (по вершине полигонов); 2) Создать по точкам TIN поверхность, и конвертировать его в растр; 3) извлечь из созданного растра расчётный участок; 4) создать поверхность Насыпи/выемки по вычету первичной поверхности

и отснятой с БПЛА ЦМР; 5) Рассчитать геометрию и подсчитать объем, согласно атрибутивной таблице созданной поверхности.

Была предпринята попытка провести ту же процедуру с уже имеющимся алгоритмом расчёта вытаявшего льда с ЦМР от ArcticDEM. Данный вид топографической поверхности не является ЦМР, а цифровой моделью местности, так как поверхность данной модели строится поверх кроули растительности, а их классификацию провести не удалось.

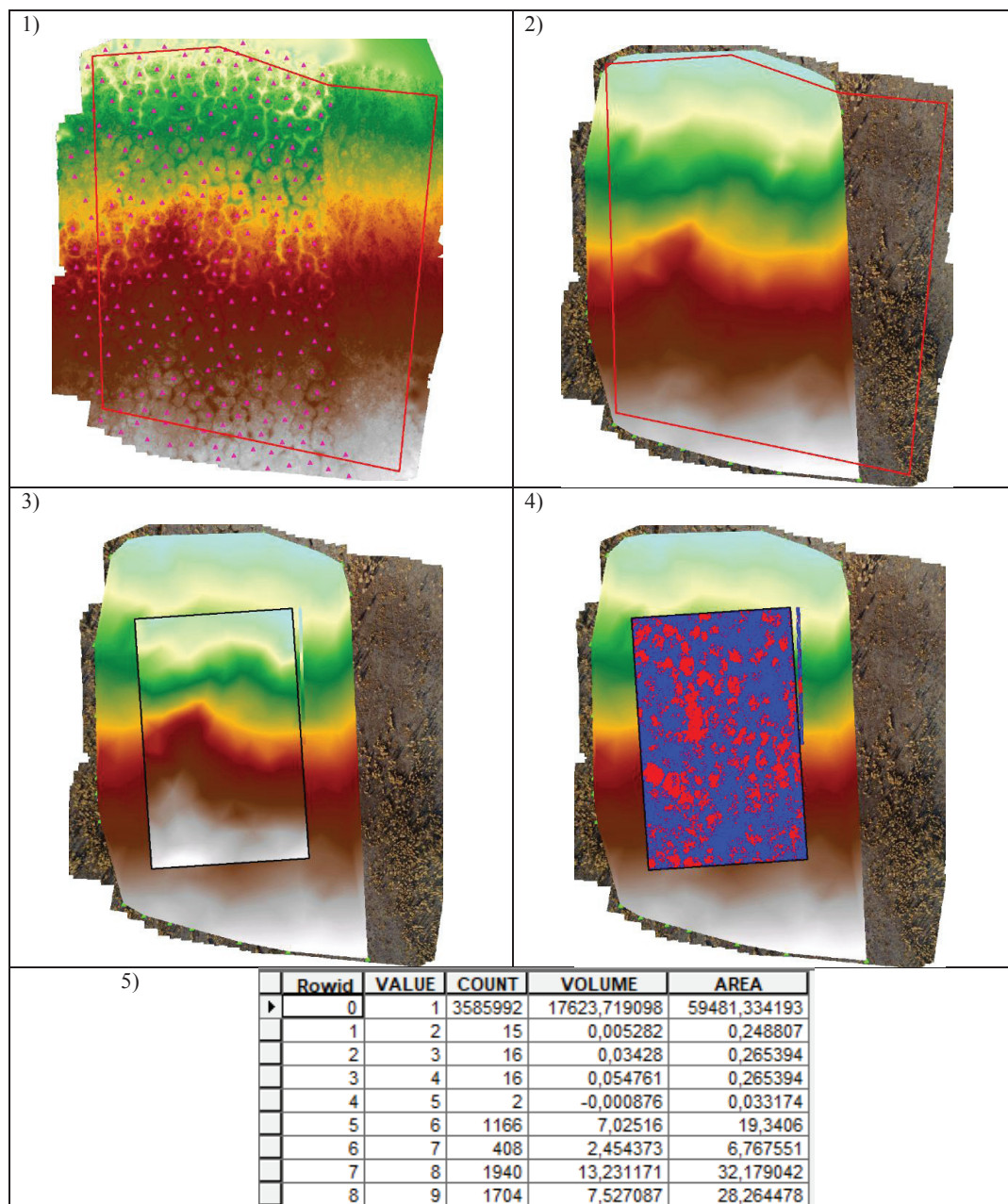


Рис. 5. Методика расчёта объема вытаявшего льда на примере восточного контрольного участка

Дистанционные методы были отобраны в общедоступных базах космических снимков порталов <https://earthexplorer.usgs.gov/>, <https://www.sentinel-hub.com/>, <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>. Так, в ходе работ были использованы снимки со спутников Landsat 7 с разрешением 30 м для дешифрирования зон лесных пожаров в 2002 и 2013, Sentinel-2 для выявления диф-

ференцированных индексов растительности и влажности поверхности), Worldview-3 для получения ЦМР в разрешении 2 метра от 19.06.2018.

Результаты

Участок 1 находится на пологом склоне восточной экспозиции седловины плоскогорья. Полностью подвержен термокарстовому процессу, даже в лесном массиве (см. рис 6а). Следы пожаров, проходивших в 2002 и 2013 годах, наблюдаются в виде обугленных и обваленных лиственниц. В низинах трещин проседания установлена высокая обводненность, вплоть до образования мелких водоемов. Рельеф нарушен, глубина вреза трещин колеблется в пределах от 0,5 метров до 2 метров.

На участке почти полностью восстановлена растительность. По нашему мнению, процесс термокарста здесь остановился на всей территории участка, кроме мест, где установились постоянные водоёмы. В них же процесс будет продолжаться, образуя талики, с охватом соседних водоёмов. Нивелирный ход подтвердил характер рельефа с погрешностью в 30 см для моделей рельефа (рис. 6б). По нескольким точкам значения высот совпали.

Подсчёты объемов вытаявшего льда на данном участке показали следующие параметры: объем вытаявшего льда составил 16364 м^3 , площадь ареала термокарстовых просадков составила 3,2 га, относительный объем вытаявшего льда составил $0,51 \text{ м}^3/\text{м}^2$. Усредненная скорость проседания по максимальным значениям составила 10,5 см/год (за период с 2002 по 2021 гг.).

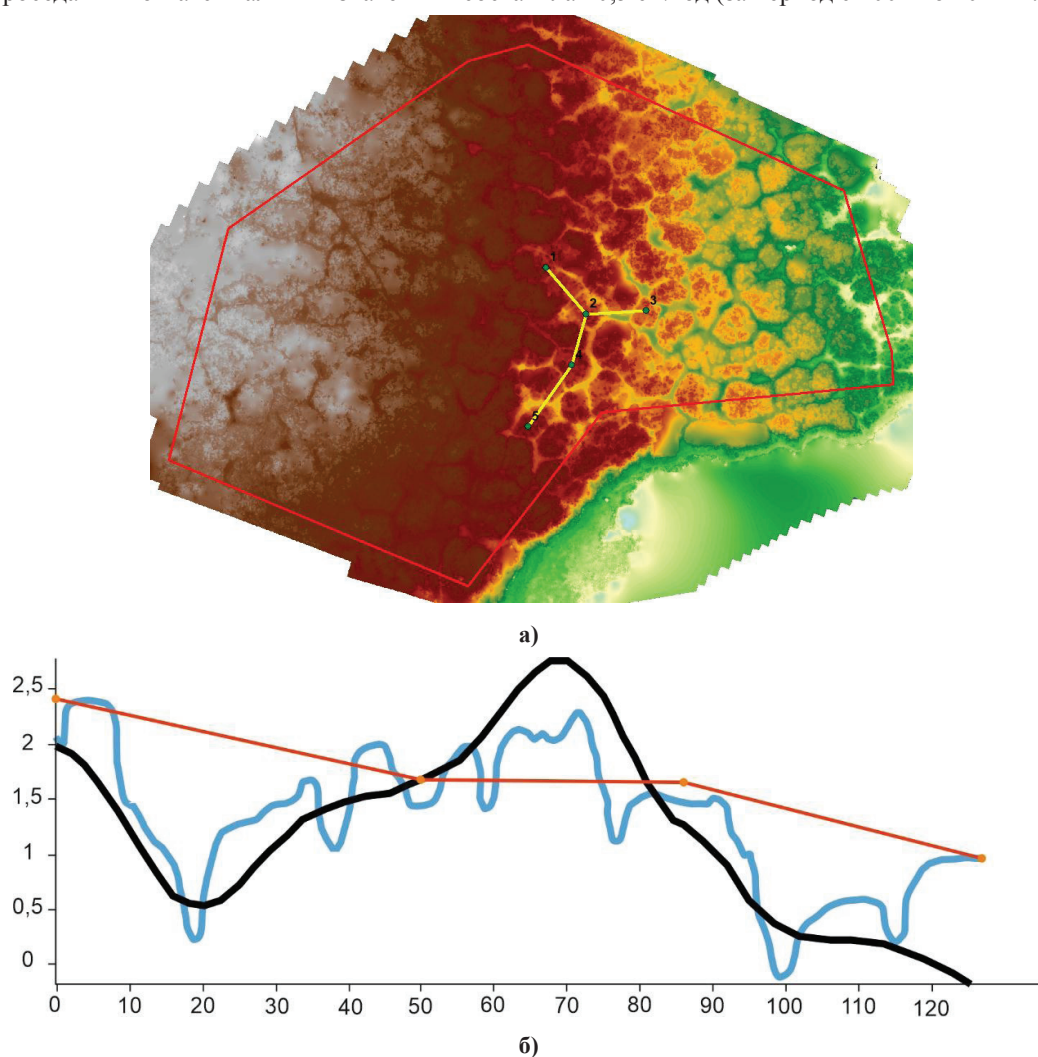


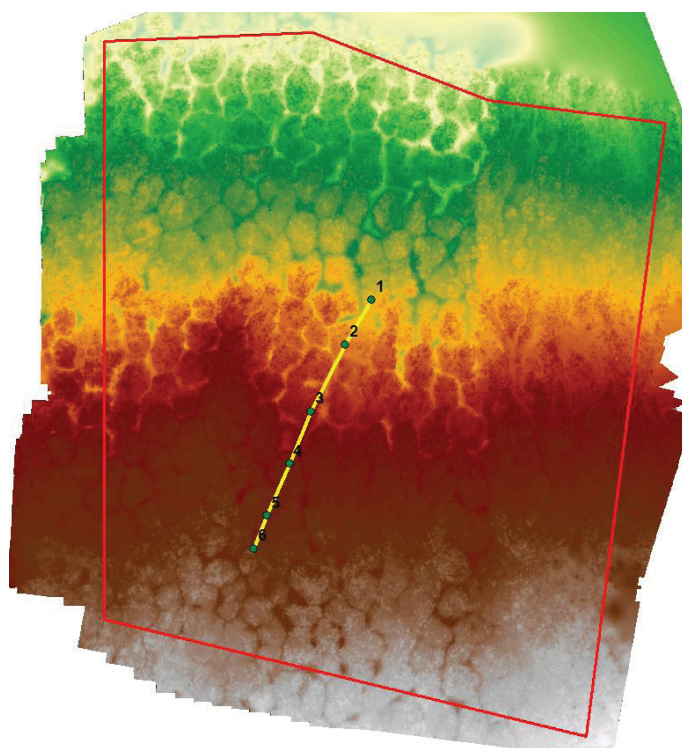
Рис. 6. а) Профили рельефа по нивелирному ходу (на схеме – желтая линия). б) Красной линией – нивелирный ход по 4 точкам, синей – ЦМР БПЛА, черной – ArcticDEM. Значения даны в метрах

Участок 2 находится на пологом склоне северной экспозиции на открытом разнотравно-злаковом лугу с повышенной влажностью грунтов. Просадки выражены сетью полигональных форм рельефа (рис. 7а). Примечательный факт обнаружен в ходе дешифрирования аэрофотоснимков: восточная часть участка имеет чёткую границу ненарушенной поверхности. Растительный покров на ней представлен кочкарником и тощей березкой; на юго-восточной части участка имеется зрелый лиственный лес. На лугу в центральной части участка выражены разнотравье и злаки с голубикой и ерником. По форме рельефа участок напоминает ложбину стока временных водотоков с широкой и пологой долиной.

Наблюдаются восстановительные сукцессионные процессы, проходившие в два различных периода. Подсчёт древесных колец молодых лиственниц показал, что их возраст соответствует 5-ти и 13-ти годам, что соответствует периодам проходивших здесь лесных пожаров. Сопоставив возраст деревьев и время распространения лесных пожаров, активное развитие сукцессионных процессов отложилось на 2-3 года с момента событий.

По сравнению с участком 1, просадки здесь в основном не достигают таких глубин, а изменяются в районе от 0,5 до 1 метра (рис. 7б), и только в обводненных межполигональных западинах достигают 2-метровой глубины.

Нивелирный ход достаточно хорошо совпал с ЦМР с БПЛА, погрешность колеблется в пределах 10 см. Согласно пространственному анализу, объем вытаявшего льда составил 17985 м³. Площадь просадок составил 6,1 га. Относительный объем вытаявшего льда – 0,29 м³/м². За период с 2002 по 2021, усредненная скорость проседания составила 5,2 см/год.



а)

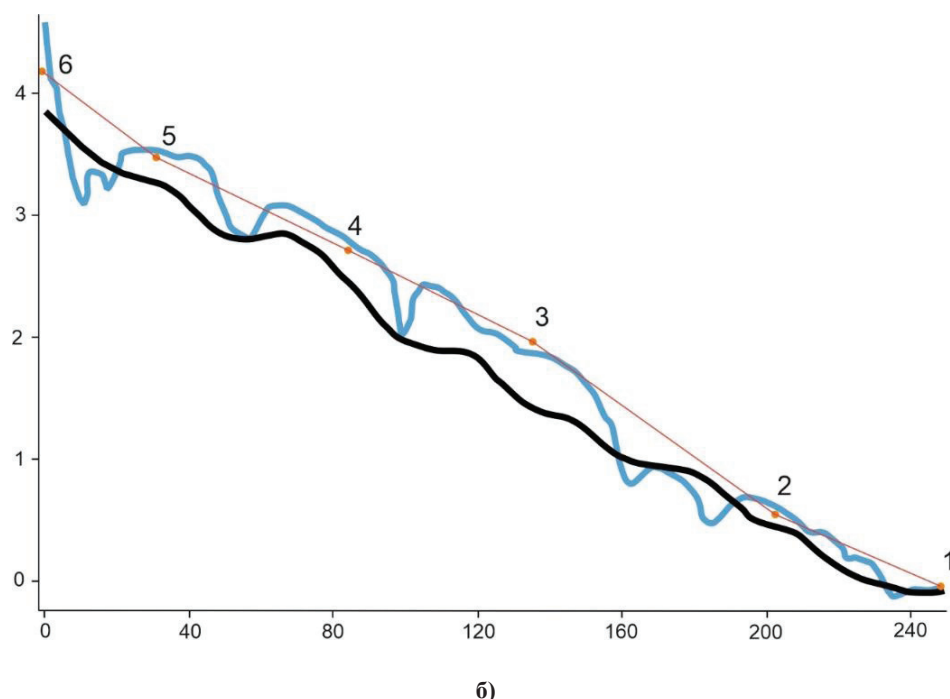


Рис. 7. Профили рельефа по нивелирному ходу (на схеме – желтая линия). Красной линией – нивелирный ход, синей – ЦМР БПЛА, черной – ArcticDEM. Значения даны в метрах.

В таблице 2 представлено сравнение показателей оттайки льда:

Таблица 2 – Сравнение параметров объемов вытаявшего льда на участках

Site name	Volume, м ³	Area of subsidence, м ² (га)	V/S, м ³ /м ²
Участок 1	16364	31909 (3.2)	0,51
Участок 2	17985	61474 (6.1)	0,29

Обсуждение

Темпы оттаивания сравнимы с Центральной Якутии (Федоров, 2020). Отличие в том, что исследования в Центральной Якутии, проводились на техногенных и нарушенных участках. Здесь же мы наблюдаем естественный процесс просадки грунтов, вследствие лесных пожаров. Можно утверждать, что последствия лесных пожаров сопоставимы с антропогенными нарушениями, а именно с удалением естественного залегания растительного покрова.

Обращаем внимание, что площадь распространения лесных пожаров на прилегающей территории исследования во много раз превышает площадь исследуемых участков. Если разработать методику расчёта вытаявшего льда с помощью топографических данных с ArcticDEM, то будет возможным проработать всю нарушенную территорию, и указать степень влияния на содержание парниковых газов от процесса оттаивания подземного льда.

Мы видим, что даже на такой маленькой площади объем вытаявшего льда составил колоссальные значения, то к участкам в более чем 100 гектар необходимо отнестись с повышенным вниманием.

Следующее что бы мы хотели отметить, так это то, что на территории с преобладанием лесных массивов, темпы деградации отказались быстрее, чем на луговых равнинах, хотя общепринято, что в лесу деградация ММГ значительно замедляется. Возможно, это связано с тем, что период сукцессии с 2002 по 2007 совпал с большим количеством атмосферных осадков, что высокая влажность грунтов не позволила замедлить процесс деградации ММГ под воздействием

сукцессионных процессов, и восстановлению растительного покрова. Так же этот самый период совпал с ростом среднегодовых температур воздуха.

Луговые же территории полностью восстановились после пожаров, и процесс термокарста, по всей видимости, приостановлен.

Заключение

ЦМР с БПЛА и ЦМП от ArcticDEM выявили хорошую корреляцию между собой, что подтвердилось полевыми измерениями. Полученные материалы позволили с высокой точностью рассчитать объем вытаявшего льда, по формам и размерам поверхностных просадок.

Было установлено и принято, как факт, что темпы деградации ММГ после лесных пожаров на льдистых грунтах, безусловно, активизируются или ускоряются. Колоссальные объёмы вытаявшего льда указывают на масштабные высвобождения парниковых газов в атмосферу, ускоряя темпы глобального потепления.

Исследуемая территория требует большего внимания со стороны научного общества, для оценки воздействия и влияния многолетней мерзлоты на изменение климата.

Литература

1. Федоров А.Н. Эволюция и динамика мерзлотных ландшафтов Якутии: автореф. дисс. д.г.н. – Федоров Александр Николаевич. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2020. – 37 с.
2. Fedorov A.N., Gavriliev P.P., Konstantinov P.Y., Hiyama T., Iijima Y. and Iwahana G. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia // *Ecohydrology*. – 2014a. – Vol. 7, Issue 2. – P. 188–196. doi: 10.1002/eco.1378.
3. Босиков Н.П. Эволюция аласов Центральной Якутии. – Якутск: ИМЗ, 1991. – 127 с.
4. Гаврильев П.П. Реакция пород ледового комплекса Центральной Якутии на потепление климата / П.П. Гаврильев, И.С. Угаров // *Криосфера Земли*. – 1999. – том 13, № 1. – С. 24–30.
5. Murton J.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Anderson P.M., Savvinov G.N., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Danilov P.P., Boeskorov V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin, Korzun J.A., Lupachev A.V., Tikhonov A., Tsygankova V.I., Vasilieva G.V., Zanina O.G. Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana Uplands, northeast Siberia // *Quaternary Research*. – 2017. – 87, 2. – P. 314–330.
6. Opel T., Murton J.B., Wetterich S., Meyer H., Ashastina K., Gunther F., Grotheer H., Mollenhauer G., Danilov P.P., Boeskorov V., Savvinov G.N., and Schirrmeister L. 2019. Past climate and continentality inferred from ice wedges at Batagay megaslump in the Northern Hemisphere's most continental region, Yana Highlands, interior Yakutia // *Climate in Past*. – 2019. – 15,4. – P. 1443–1461. doi: 10.5194/cp-15-1443-2019.
7. Васильчук Ю.К. Изотопный состав углерода и полиарены в педогенном материале ледяных жил Батагайской едомы (Якутия) / Ю.К. Васильчук, А.Д. Белик, Н.А. Буданцева, А.Н. Геннадиев, Д.Ю. Васильчук // *Почвоведение*. – 2020. – № 2. – С. 188–198.
8. Вдовина Л.Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. – Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2002. – 1 л.
9. Мурзин Ю.А. Кигиляхи Якутии / Ю.А. Мурзин // *Природа*. – 2004. – № 5. – С. 54–57.
10. Гриненко О.В., Сергеенко А.И., Белолуцкий И.Н. Палеоген и неоген Северо-Востока России. Ч. II. Региональная стратиграфическая схема палеогеновых и неогеновых отложений Восточной Якутии и Объяснительная записка к ней. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1998. – 60 с.

References

1. Fedorov A.N. Evolyuciya i dinamika merzlotnyh landshaftov YAKutii: avtoref. diss. d.g.n. – Fedorov Aleksandr Nikolaevich. – YAKutsk: IMZ SO RAN, 2020. – 37 s.
2. Fedorov A.N., Gavriliev P.P., Konstantinov P.Y., Hiyama T., Iijima Y. and Iwahana G. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia // *Ecohydrology*. – 2014a. – Vol. 7, Issue 2. – P. 188–196. doi: 10.1002/eco.1378.
3. Bosikov N.P. Evolyuciya alasov Central'noj YAKutii. – YAKutsk: IMZ, 1991. – 127 s.

4. Gavril'ev P.P. Reakciya porod ledovogo kompleksa Central'noj YAkutii na poteplenie klimata / P.P. Gavril'ev, I.S. Ugarov // Kriosfera Zemli. – 1999. – tom 13, № 1. – S. 24–30.
5. Murton J.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Anderson P.M., Savvinov G.N., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Danilov P.P., Boeskorov V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin, Korzun J.A., Lupachev A.V., Tikhonov A., Tsygankova V.I., Vasilieva G.V., Zanina O.G. Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana Uplands, northeast Siberia // Quaternary Research. – 2017. – 87, 2. – P. 314-330.
6. Opel T., Murton J.B., Wetterich S., Meyer H., Ashastina K., Gunther F., Grotheer H., Mollenhauer G., Danilov P.P., Boeskorov V., Savvinov G.N., and Schirrmeister L. 2019. Past climate and continentality inferred from ice wedges at Batagay megaslump in the Northern Hemisphere's most continental region, Yana Highlands, interior Yakutia // Climate in Past. – 2019. – 15,4. – P. 1443-1461. doi: 10.5194/cp-15-1443-2019.
7. Vasil'chuk YU.K. Izotopnyj sostav ugleroda i poliarenny v pedogenom materiale ledyanyh zhil Batagajskoj edomy (YAkutiya) / YU.K. Vasil'chuk, A.D. Belik, N.A. Budanceva, A.N. Gennadiev, D.YU. Vasil'chuk // Pochvovedenie. – 2020. – № 2. – S. 188-198.
8. Vdovina L.G. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:200 000. – Sankt-Peterburg: Izd-vo VSEGEI, 2002. – 1 l.
9. Murzin YU.A. Kigilyahi YAkutii / YU.A. Murzin // Priroda. – 2004. – № 5. – S. 54–57.
10. Grinenko O.V., Sergeenko A.I., Belolyubskij I.N. Paleogen i neogen Severo-Vostoka Rossii. CH. II. Regional'naya stratigraficheskaya skhema paleogenovyh i neogenovyh otlozhenij Vostochnoj YAkutii i Ob'yasnitel'naya zapiska k nej. – YAkutsk: Izd-vo YANC SO RAN, 1998. – 60 s.

— ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТА —

УДК 502.572: 504.055: 910.27
DOI 10.25587/SVFU.2022.25.1.014*А.В. Остроухов, Г.В. Харитонов*

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

**ВЛИЯНИЕ ПОЖАРОВ НА СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
РЕК И ОЗЁР УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ
СРЕДНЕАМУРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ**

Аннотация. Ландшафтные пожары, являющиеся важным фактором функционирования и трансформации геосистем (наземные геосистемы, атмосферный воздух, растительный и животный мир), оказывают существенное влияние и на водные экосистемы. Настоящая работа посвящена оценке влияния пожаров на водные экосистемы урбанизированных территорий Среднеамурской низменности (в пределах Хабаровского края). Задачами работы являются оценка горимости и пирогенной трансформации исследуемой территории на основе анализа и дешифрирования многолетних рядов данных ДЗЗ; анализ особенностей состава и закономерностей постпирогенного изменения донных отложений ключевого участка (бассейн р. Симми, малый приток р. Амур). Для определения среднесуточных характеристик природных пожаров и тенденций их изменения были использованы безоблачные данные свободного доступа со спутников Landsat 5, 7 и 8 за период с 1984 по 2020 гг. Обработка данных ДЗЗ проводилась методом экспортного дешифрирования в программе ArcGIS 10.5.

На основе многолетних рядов данных ДЗЗ были выделены площади ландшафтных пожаров за период с 1984 по 2020 год. Анализ полученных данных свидетельствует о значительных масштабах и высокой повторяемости пирогенного воздействия на геосистемы территории. Результаты работы показывают значительное занижение площадей луговых пожаров по данным официальной статистики. По среднесуточным данным ДЗЗ в пределах Среднеамурской низменности пожарами затронуто от 27 до 35 % лесных экосистем, а в отдельные годы площади пожаров превышают 50 % территории, что сопоставимо с площадями лесных пожаров в Хабаровском крае в целом. При этом по официальным данным на лесные пожары в крае приходится лишь 8,9 %. Недооценка влияния луговых пожаров связана, по нашему мнению, в первую очередь с несовершенством методов автоматического картирования гарей, что приводит к занижению их площадей.

В пределах ключевой территории были изучены донные отложения р. Симми. Отбор проб (15 образцов, по стандартным методикам) был проведен в мае 2018 года (на третий год после осеннего пожара 2016 г.) и в июле 2019 г. после весеннего (март–апрель) пожара. Основными методами исследования были гранулометрический и валовой химический анализы, а также сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Гранулометрический состав определяли методами седиментации по Качинскому и лазерной дифракции на анализаторе размера частиц (SALD-2300, Shimadzu, Japan). Валовой состав определяли рентгенфлуоресцентным методом (Pioneer S4, Bruker AXS, Germany). СЭМ-анализ проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMN (TESCAN, Czech Republic). Основные методы исследования были дополнены стандартными физико-химическими методами анализа.

Полученные нами данные для ключевого участка свидетельствуют, что прохождение луговых пожаров на водосборной территории влечет за собой изменение химического состава отложений. В первые месяцы

ОСТРОУХОВ Андрей Вячеславович – к.г.н., в.н.с., Институт водных и экологических проблем ДВО РАН. E-mail: Ostran2004@bk.ru

OSTROUKHOV Andrei Viacheslavovich – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Institute of Water and Ecology Problems FEB RAS. E-mail: Ostran2004@bk.ru

ХАРИТОНОВА Галина Владимировна – д.б.н., г.н.с., Институт водных и экологических проблем ДВО РАН. E-mail: Ostran2004@bk.ru

KHARITONOVA Galina Vladimirovna – Doctor of Biological Sciences, Principal researcher, Institute of Water and Ecology Problems FEB RAS. E-mail: Ostran2004@bk.ru

после пожара реакцией речной системы является секвестирование растворимых соединений Р, которые образуются при «огневой» минерализации. Это происходит в результате связывания фосфат-ионов в вивианит, растворимость которого чрезвычайно мала в отсутствие сульфатов и сульфат-редуцирующих бактерий. Вивианит осаждается на поверхности глинисто-железистых микроагрегатов взвешенной фракции наносов, которая со временем (2–3 года) выносится потоком, что приводит к снижению масштабов воздействия пожара на локальных участках.

Ключевые слова: ландшафтные пожары, Среднеамурская низменность, данные дистанционного зондирования, геоинформационный анализ, водные объекты, донные отложения.

A. V. Ostroukhov, G. V. Kharitonova

Institute of Water and Ecology Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia

THE EFFECT OF WILDFIRES ON THE COMPOSITION OF BOTTOM SEDIMENTS OF RIVERS AND LAKES IN URBANIZED AREAS OF THE MIDDLE AMUR LOWLAND

Abstract. Wild fires is an important factor in the functioning and transformation of geosystems. The aim of the study is to assess the impact of fires on the aquatic ecosystems of urbanized areas of the Middle Amur Lowland (within Khabarovsk Krai). The tasks of the work are to assess the burnability and pyrogenic transformation of the territory based on the analysis of long-term earth remote sensing (ERS) data series and to analyze the composition and patterns of post-pyrogenic changes in the bottom sediments of the key site (basin of the Simmi River, small tributary of the Amur River). Cloudless data of free access from Landsat 5, 7 and 8 satellites for 37-yr (1984 – 2020) were used to determine the average long-term characteristics of wildfires and trends in their changes. ERS processing was carried out by the expert decryption method in the ArcGIS 10.5 program.

The analysis of allocated wild fires indicates a significant scale and high repeatability of pyrogenic effects on the geosystems of the territory. Grass fires affected from 27 to 35 % of non-forest ecosystems, exceed 50 % in some years, which is comparable to the areas of forest fires. But according to official data, due to the imperfection of the methods of automatic mapping of the burnt-out territory, non-forest fires in the region account for only 8.9 %.

The bottom sediments were studied in the key site. Sampling (15 samples, according to standard methods) was carried out in May 2018 (in the third year after the autumn fire of 2016) and in July 2019 after the spring (March–April) fire. The main research methods were granulometric and gross chemical analyses and scanning electron microscopy (VEGA 3 LM scanning electron microscope, TESCAN, Czech Republic). The granulometric composition was determined by laser diffraction on a particle size analyzer (SALD-2300, Shimadzu, Japan). The gross composition was determined by X-ray fluorescence method (Pioneer S4, Bruker AXS, Germany). Our data indicate that the passage of grass fires in the catchment area entails a change in the chemical composition of BS formed in the post-pyrogenic period. In the first months after the fire, the reaction of the river system is the sequestration of soluble P compounds, which are formed during “fire” mineralization. This occurs as a result of the binding of phosphate ions into vivianite. It is precipitated on the surface of clay-ferruginous microaggregates of a suspended sediment fraction, which over time (2–3 years) is carried out by the stream. The latter leads to a reduction in the scale of the impact of the fire.

Keywords: landscape fires, Middle Amur lowlands, remote sensing data, geo-information analysis, water bodies, bottom sediments.

Введение

Изучение функционирования и трансформации геосферы под влиянием деятельности человека является одним из приоритетных научных направлений в настоящее время [1]. Большое количество работ посвящено оценке масштабов и влиянию природных пожаров в бореальной зоне северного полушария [2–4] (главным образом лесных [5–7] и торфяных [8–9]), а также последствиям сельскохозяйственных палов в Северной Америке [10], Восточной Европе [11–12] и Азии [13]. В России – крупнейшей лесной державе мира – решению проблем, связанных с лесными пожарами, всегда уделялось большое внимание [14]. В последние десятилетия много работ появилось и о пожарах на нелесных территориях – степных и лесостепных пространствах Европейской части России, юга Западной Сибири, степей засушливой континентальной части Восточной Сибири. Проведенные исследования степных территорий (Европейская

часть России, Белоруссия, Литва и др.) выявили значительные площади неучтенных сгоревших сельскохозяйственных угодий и пастбищ [15]. Показано, что на долю Европейской территории России приходится 31–36 % мировых сельскохозяйственных палов.

Подобными исследованиями экосистемы луговых и лугово-болотных сообществ бореальной зоны охвачены слабо. По сравнению с лесными, пожары в этих экосистемах (при низких показателях эмиссии углерода) за счет значительной скорости накопления горючих материалов характеризуются высокой повторяемостью [16]. Особенностью бореальных лугов является наличие двух пожароопасных сезонов (весна и/или осень), что отличает их от австралийских бушей и африканских саванн, сравнимых по массе горючих растительных материалов [17]. Сезон весенних травяных палов в лугово-болотные экосистемах начинается со схода снега и высыхания прошлогодней травы (ветоши) на открытых участках, заканчивается с началом активного роста травянистой растительности. Длится он обычно не более 3–4 недель. Начало осенних пожаров приходится на конец вегетации и заканчивается с выпадением снега.

Одним из таких регионов бореальной зоны, где широко распространены лугово-болотные экосистемы, является российская часть трансграничной Амуро-Сунгарийской равнины – Среднеамурская низменность. В пределах Хабаровского края ее площадь составляет 4,1 млн. га. Практически ежегодно здесь наблюдаются масштабные природные пожары, охватывающие луговые и лугово-болотные экосистемы (рис. 1). Предпосылками их возникновения являются климатические особенности территории, специфика растительного покрова, характер освоения [18].

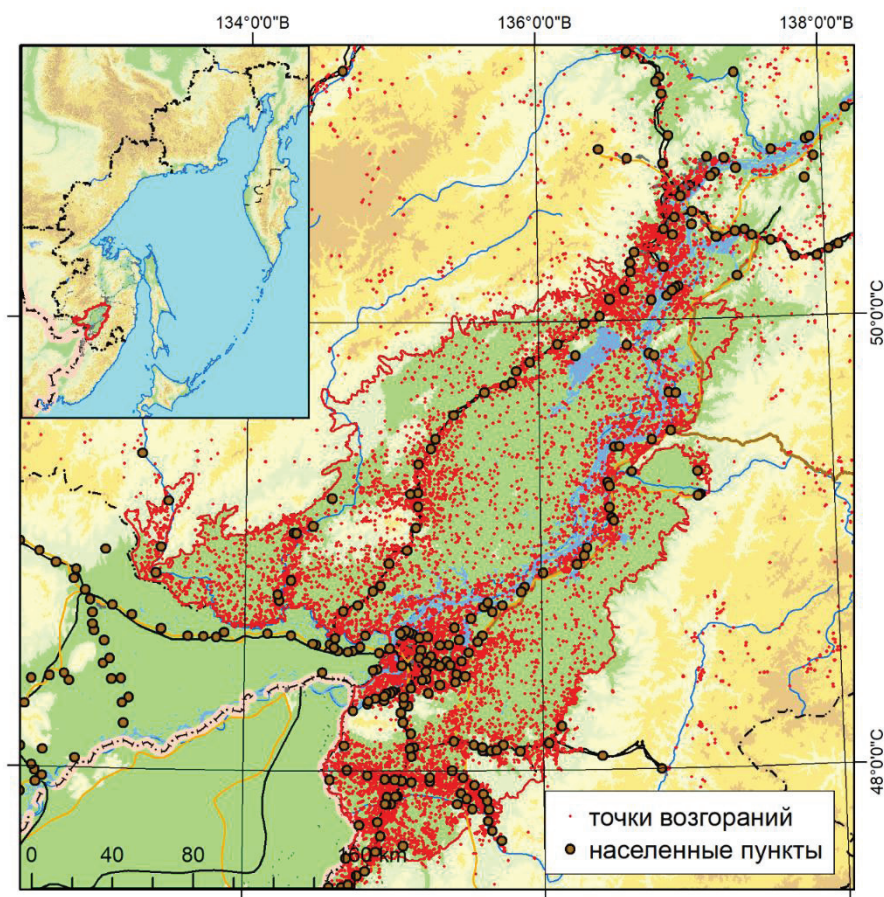


Рис. 1. Точки возгораний за 2000 – 2020 годы в пределах Среднеамурской низменности (по данным ИСДМ – Рослесхоз [19])

Активное (промышленное и сельскохозяйственное) освоение Среднеамурской низменности началось с конца XIX в., но происходило весьма неравномерно. Вначале хозяйственная

деятельность охватила только ее западную, а позже – южную правобережную часть. В настоящее время общая площадь нарушенных земель составляет 7,6 % [18]. Для системы расселения и землепользования Среднеамурской низменности характерна высокая концентрация освоенных земель и населённых пунктов главным образом вдоль основных транспортных магистралей (Биробиджан – Хабаровск – Владивосток, Хабаровск – Комсомольск-на-Амуре) и вокруг крупнейших городов (Хабаровск, Комсомольск – на – Амуре). Именно для этих территорий с высокой степенью освоенности характерно максимальное количество возгораний (рис. 1). К сожалению, в статистических данных (с 2000 по 2021 годы) системы ИСДМ Рослесхоз информация о пространственных границах пожаров отсутствует. Пожары на нелесных землях включены в официальную статистику лишь с 2016 года. Это определяет актуальность задачи картирования пожаров по многолетнему ряду данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Влияние столь масштабного фактора как ландшафтные пожары отмечается не только для наземных геосистем, атмосферного воздуха, растительного и животного мира, но и для водных экосистем [20–21]. Прохождения пожара на водосборной территории влечет за собой изменение химического состава речных и озерных вод, что не может не отражаться на химическом составе донных отложений, формирующихся в постпирогенный период [22].

Целью настоящей работы является оценка влияния пожаров на состав донных отложений рек и озёр урбанизированных территорий Среднеамурской низменности (в пределах Хабаровского края). Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Оценка горимости и пирогенной трансформации исследуемой территории на основе анализа и дешифрирования многолетних рядов данных ДЗЗ.
2. Анализ особенностей состава и закономерностей постпирогенного изменения донных отложений ключевого участка (р. Симми, малый приток р. Амур).

Материалы и методы

В данной работе для выделения площадей, пройденных огнём, по данным ДЗЗ из двух основных подходов: 1. детектирование активного горения, основанное на применении данных низкого пространственного разрешения (250–500–1000 м) с высокой частотой съемки (MODIS, VIIRS и др.) [11, 23] и 2. картографирование гарей с использованием данных среднего и высокого пространственного разрешения (10–15–30 м) в видимом и инфракрасном диапазоне [24–25], нами был использован второй подход. Выбор обусловлен низким уровнем пространственного разрешения данных ДЗЗ активного горения. В результате узкая кромка огня и малая площадь зоны горения в пределах луговых и лугово-болотных экосистем, а также сильное задымление препятствуют обнаружению пожара [23, 26].

Высокая повторяемость травяных пожаров (ежегодная, иногда и двукратная за год), чередование лет с малой и высокой горимостью определили необходимость использования данных длительного периода наблюдений для определения среднемноголетних характеристик природных пожаров и тенденций их изменения [17]. Выделение гарей в травяных экосистемах затрудняется высокой скоростью возобновления растительного покрова в весенний и выпадением снега в осенний период. Поэтому были использованы все безоблачные данные свободного доступа со спутников Landsat 5, 7, 8 (475, 328 и 189 шт. соответственно) за период с 1984 по 2020 гг. (сайт Earth Explorer <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Обработка данных ДЗЗ проводилась методом экспертного дешифрирования в программе ArcGIS 10.5. Для компенсации возможных ошибок дешифрирования из площадей весенних пожаров текущего года удалялись территории, пройденные пожарами осенью предыдущего.

В пределах ключевой территории были изучены донные отложения р. Симми (Болоньский государственный природный заповедник) в нижнем течении, оз. Килтасин (озеро-видное расширение русла р. Симми) и протоки Ерсуйн, соединяющей его с оз. Болонь. Отбор проб (15 образцов, по стандартным методикам) был проведен в мае 2018 года (на третий год после осеннего пожара 2016 г.) и в июле 2019 г. после весеннего (март–апрель) пожара. Известно, что наибольшее содержание биогенных элементов в почве и речных водах наблюдается в первые 3–4 месяца после пожара. Через 2–4 года их содержание падает и приближается к фоновым значениям [27]. Данные 2018 г. [28] соответствуют остаточному влиянию обширного осеннего пожара 2016 г.,

которым было пройдено 80 % территории заповедника. Пожар 2019 г. был менее интенсивным и затронул главным образом правобережье р. Симми.

При отборе использовали стандартное оборудование и методики. Основные методы исследования – сканирующая электронная микроскопия (СЭМ-анализ), валовой химический (РФА) и гранулометрический анализы – были дополнены стандартными физико-химическими методами анализа. Гранулометрический состав определяли методами седиментации по Качинскому и лазерной дифракции на анализаторе размера частиц (SALD-2300, Shimadzu, Japan). Валовой состав определяли рентгенофлуоресцентным методом (Pioneer S4, Bruker AXS, Germany). СЭМ-анализ был проведен с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMH (TESCAN, Czech Republic). Элементный состав наиболее репрезентативных участков образцов был проанализирован с использованием X-мак 80 энергодисперсионного спектрометра (Oxford Instruments, UK). РФА анализы проводились в аналитическом центре ИТИГ ДВО РАН, Хабаровск.

Результаты и обсуждения

В результате обработки данных ДЗЗ за 1984–2020 гг. в пределах Среднеамурской низменности были выделены территории, пройденные пожарами в весенний и осенний периоды (рис. 2). В этом временном ряду среднеегодовое воздействие составило 25,4 %. Минимальные масштабы пирогенного воздействия наблюдались в 1984, 1994, 2010 годах, когда пожарами было охвачено 5,7, 5,3 и 2,8 % территории соответственно. В самые неблагоприятные годы (1996, 2005) этот показатель превышал 50 %. Суммарная площадь пожаров за этот период составила более 38 млн. га или 938 % от площади территории – значительные площади территорий подвергались воздействию огня многократно.

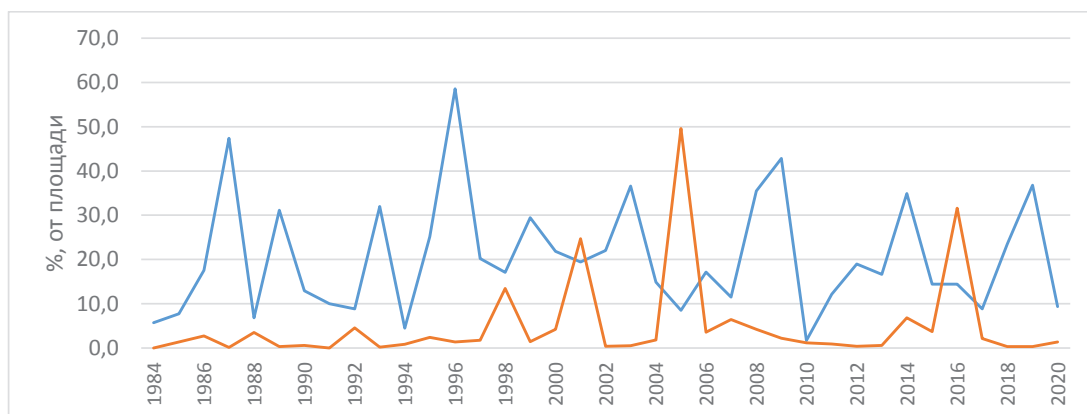


Рис. 2. Площади весенних (синяя линия) и осенних (красная линия) пожаров на территории Среднеамурской низменности в 1984 – 2020 годах

По многолетним статистическим данным на юге Российского Дальнего Востока самая высокая горимость природных экосистем наблюдается в весенний период [29]. В это время возникает примерно половина всех возгораний лесов (49,2 %). В летний период отмечено 36,9 % от общего числа пожаров, которые обычно связаны с длительными засухами, а осенью – не более 13,5 % [30].

Цикл луговых пожаров в среднем составляет 2–4 года, что связано с накоплением горючего материала в природных экосистемах (главным образом, ветоши трав) [31]. Среднее количество пожаров за 37-летний период на исследуемой территории не превышает 4–10, однако для отдельных участков территории повторяемость пожаров составила 36 раз (рис. 3). Это, прежде всего, наиболее освоенные земли городских и сельских поселений с хорошо развитой транспортной инфраструктурой и сельскохозяйственные земли (юго-западная и южная части Среднеамурской низменности), а также участки, прилегающие к железнодорожным и крупным автомобильным магистралям.

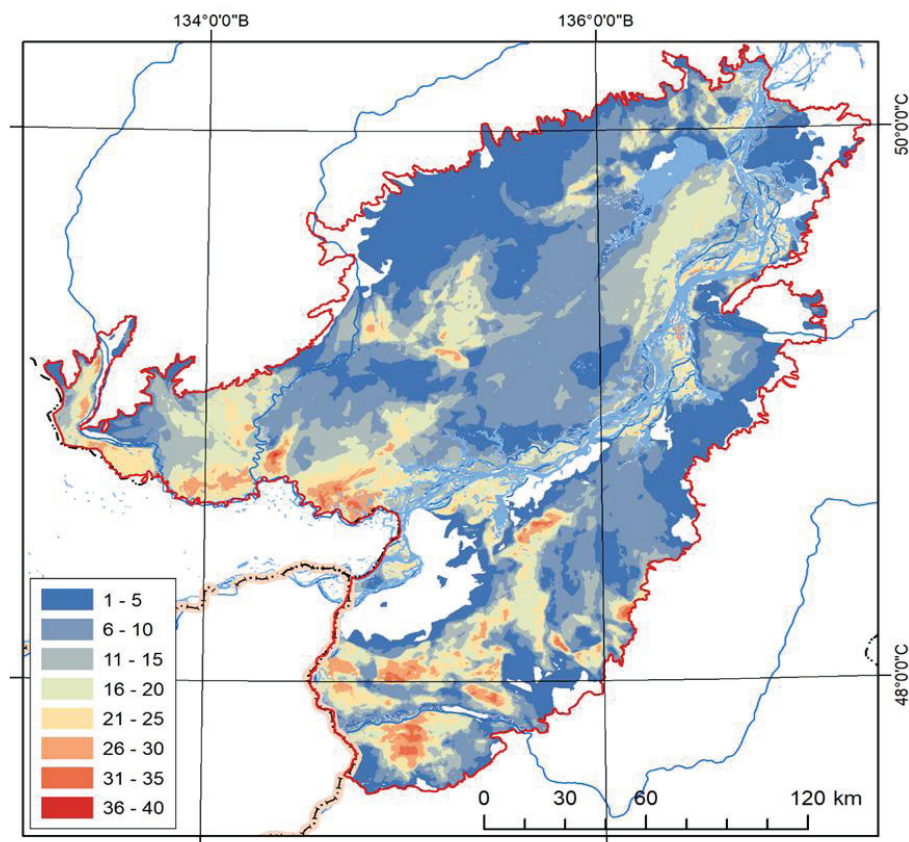


Рис. 3. Повторяемость пожаров за период с 1984 по 2020 годы

Для проверки достоверности картографических материалов, полученные результаты сравнивались с данными Глобальных ежегодного картирования сгоревших лесных площадей (GABAM) 30 метрового разрешения [25] и данными о количестве горячих точек VIIRS с сайта Fire Information for Resource Management System (FIRMS) [32] за 2012, 2016, 2018, 2020 гг.

Рис. 4 свидетельствует о значительной недооценке площади пожаров на исследуемой территории как по материалам картирования гарей в автоматическом режиме на основе данных Landsat-8 (GABAM), так и на основе детектирования HS (VIIRS), что отмечалось ранее для других территорий [11, 33-34]. Однако наши результаты близки к данным, полученным в результате экспертного дешифрирования материалов среднего и высокого пространственного разрешения (Sentinel-2) [35]. Так, площадь гарей весной 2020 г. по нашим данным составила 349,5 тыс. га, а по данным Гринпис – 354,5 тыс. га. Небольшая разница объясняется недоучетом сельскохозяйственных палов.

Причинами недооценки площадей пожаров могут стать многие факторы: задымление территории и поглощение CO₂ в атмосфере; малый запас биомассы и соответственно низкая интенсивность пожара; относительно малый размер пожара и/или его прохождение узкой длинной полосой в совокупности с высокой скоростью движения кромки огня при низком пространственном разрешении спутниковых приборов, используемых для детектирования действующих пожаров; быстрое возобновление и рост травянистой растительности в весенний период в сочетании с большим интервалом съёмки снижает излучение в ИК-канале и затрудняет автоматическую классификацию гарей; неоднородность наземного покрова, которая усложняет выбор соответствующей фоновой температуры.

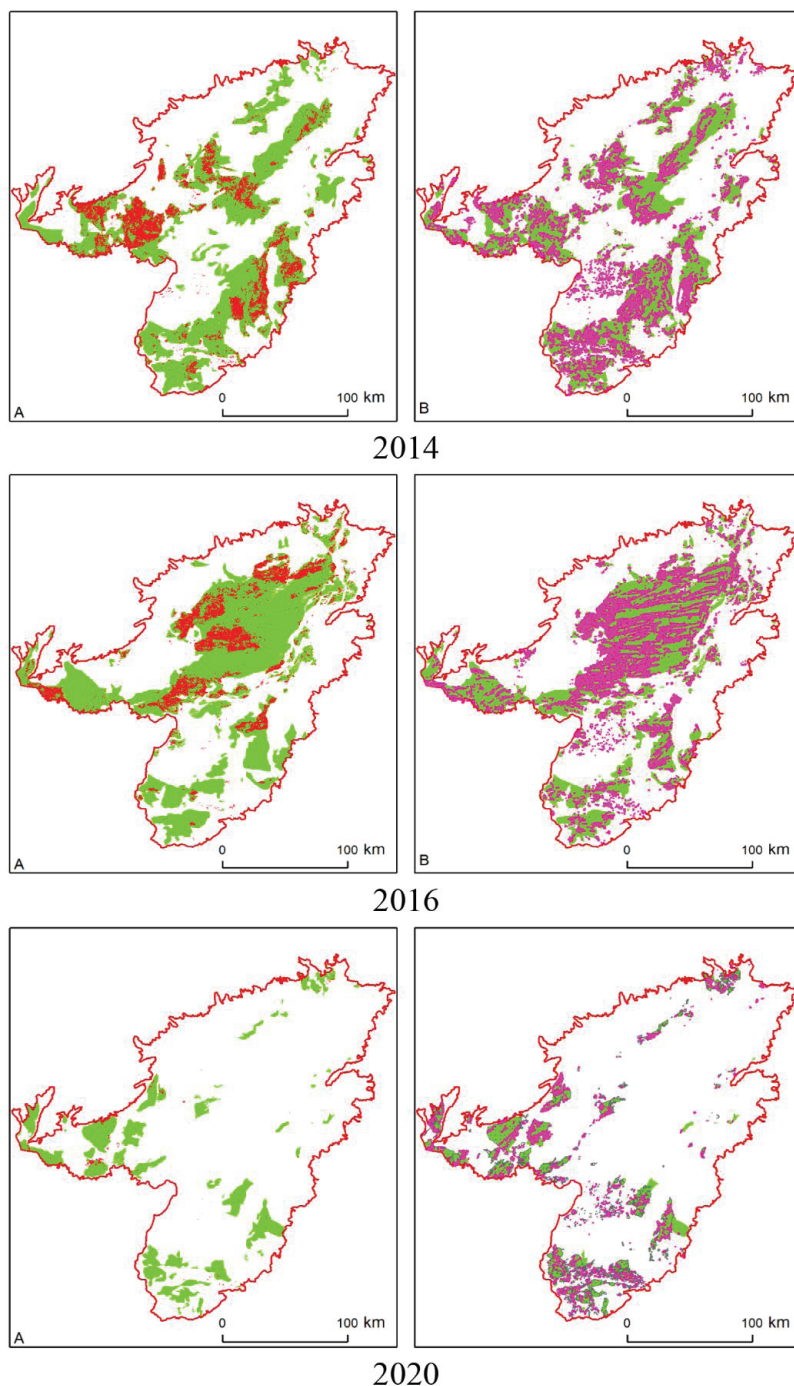


Рис. 4. Площади гарей в 2014, 2016, 2020 годах по разным данным (зелёный – наши материалы, красный – GABAM [26], розовый – VIIRS [32], серый – Greenpeace [35])

Анализ пространственного распределения пожаров в пределах исследуемой территории свидетельствует о совпадении участков высокой повторяемости пожаров с положением освоенных земель и объектов транспортной инфраструктуры. Кроме сельскохозяйственного землепользования причинами пожаров являются охота, рыбалка и заготовка дикоросов, с которыми связана высокая повторяемость пожаров вдоль рек и озёр, выполняющих роль транспортных артерий в северной и центральной части равнины. Всё это свидетельствует об антропогенном

характере основной части природных пожаров, что не противоречит данным официальной статистики [36] и подтверждается полевыми исследованиями [29].

Таким образом, анализ полученных нами данных ДЗЗ за многолетний период (1984–2020 гг.) свидетельствует о значительных масштабах и высокой повторяемости пирогенного воздействия на геосистемы территории Хабаровского края, прилегающие главным образом к зонам основного расселения и землепользования. Результаты работы показывают значительное занижение площадей луговых пожаров по данным официальной статистики. По среднемноголетним данным ДЗЗ в пределах Среднеамурской низменности пожарами затронуто от 27 до 35 % нелесных экосистем, а в отдельные годы площади пожаров превышают 50 % от площади территории, что сопоставимо с площадями лесных пожаров в Хабаровском крае в целом. При этом по официальным данным на нелесные пожары в крае приходится лишь 8,9 %.

Для исследуемой территории значительное влияние луговые пожары оказывают не только на наземные экосистемы, но и на водные объекты. Полученные нами данные для ключевого участка (бассейн р. Симми, малый приток Амура) свидетельствуют, что прохождение луговых пожаров на водосборной территории влечет за собой изменение химического состава донных отложений, формирующихся в постпирогенный период.

В качестве основного маркера “пожарной нагрузки” на состав донных отложений мы использовали содержание в них фосфора по следующим причинам. Во-первых, фосфор является одним из важнейших макроэлементов (С, N и P) огневой минерализации. Во-вторых, основная масса углерода в виде CO_2 и пылевых аэрозолей попадает в воздушную среду [37], обогащение азотом в виде растворимых солей, как правило, связано с водой средой [38]. В то время как фосфор уже в первые месяцы после пожаров в виде нерастворимых фосфатов железа и кальция аккумулируется в донных отложениях [39–40]. И в-третьих, луговые ценозы сравнению лесными и кустарниковыми характеризуются большим содержанием фосфора по [41].

Согласно данным полученным ранее [42–43], донные отложения р. Симми характеризуются существенно более высоким содержанием валового железа по сравнению с кальцием. Так, если содержание кальция в образцах не превышало 1 % (в пересчете на CaO), то содержание валового Fe много выше – до 6 % в пересчете на Fe_2O_3 . Электронно-микроскопический анализ отложений показал, что повышенное содержание железа связано не только с кластогенными зернами акцессорных минералов, содержащими железо, таких как ильменит и др., но и с глинисто-железистыми микроагрегатами. Хорошо известно, что в водных объектах оксиды/гидроксиды Fe(III) играют важную роль в связывании и осаждении фосфат-ионов. Поскольку фосфаты Fe(III) подвержены микробному и химическому восстановлению и служат источником для Fe^{2+} и ортофосфата, они могут выступать в качестве прекурсора фазы вивианита. Кроме того, присутствие органических веществ (до 2,3 % С) позволяет предполагать образование в отложениях вивианита $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

Новообразования вивианита в отложениях были диагностированы после весеннего пожара (март–апрель 2019 г.) в период максимального поступления в речные воды фосфат-ионов (первые месяцы после пожара), когда содержание фосфора в донных отложениях достигало 2200 мг/кг (в пересчете на P_2O_5). Образование вивианита было зафиксировано во всех точках отбора в составе глинисто-железистых микроагрегатов размером до 100 мкм. Согласно ЭДС анализу атомное соотношение Fe:P в вивианит-глинистых микроагрегатах составляет 3:2. Несколько меньшее количество глинистых микроагрегатов с участием вивианита для части образцов было связано с присутствием сульфат-ионов и сульфат-восстанавливающих бактерий, и образованием менее растворимого, чем вивианит фрамбоидного пирита FeS_2 . Доля вивианитовой фазы (количество глинистых микроагрегатов с участием вивианита) в отложениях значительно уменьшалось в местах отбора проб с более высокими скоростями потока. Образование вивианита было отмечено и для отдельных биологических темплатов (органические остатки, одноклеточные микроорганизмы), но с большим соотношением Fe:P до 10:1. Отметим, что фосфаты кальция в донных отложениях встречаются лишь в виде отдельных выветрелых зерен апатита.

Обнаружение вивианита в поверхностном слое отложений свидетельствует о недавнем его образовании. Обычно технические проблемы затрудняют прямую идентификацию вивианита в донных отложениях, для его определения используют различные методы мацерации, тяжелые

жидкости в том числе [39]. В нашем случае определение проводилось без специальной подготовки образцов. Поэтому с большой долей вероятности триггером образования вивианита в донных отложениях следует считать повышенные содержания в речной воде фосфат-ионов, поступающих с территории водосбора в результате пожаров.

На третий год после интенсивного пожара 2016 г., когда огнем было пройдено почти 80 % ключевого участка, вивианит в отложениях обнаружен не был. Поскольку растворимость вивианита крайне мала, причиной последнего следует считать подвижность новообразований в водном потоке вследствие их малого размера (менее 100 мкм). Во взвешенном состоянии частицы размером менее 100 мкм могут переноситься на большие расстояния, это транзитная составляющая речных наносов.

Заключение

В ходе работы на основе многолетних рядов данных ДЗЗ были выделены площади ландшафтных пожаров за период с 1984 по 2020 год. Анализ полученных данных говорит о значительных масштабах и высокой повторяемости пирогенного воздействия на геосистемы территории, прежде всего, прилегающих к зонам основного расселения и землепользования. Результаты работы показывают значительное занижение площадей луговых пожаров по данным официальной статистики. По среднесуточным данным ДЗЗ в пределах Среднеамурской низменности пожарами затронуто от 27 до 35 % нелесных экосистем, а в отдельные годы площади пожаров превышают 50 % от площади территории, что сопоставимо с площадями лесных пожаров в Хабаровском крае в целом. При этом по официальным данным на нелесные пожары в крае приходится лишь 8,9 %. Недооценка влияния луговых пожаров связана, по нашему мнению, в первую очередь с несовершенством методов автоматического картирования гарей, приводящих к занижению их площадей.

Исследования показали, что значительное влияние ландшафтные пожары оказывают не только на наземные экосистемы, но и на водные объекты. Полученные нами данные для ключевого участка (бассейн р. Симми, малый приток Амура) свидетельствуют, что прохождение луговых пожаров на водосборной территории влечет за собой изменение химического состава донных отложений, формирующихся в постпирогенный период. В первые месяцы после пожара года реакцией речной системы является секвестирование растворимых соединений Р, которые образуются в результате «огневой» минерализации. Это происходит в результате связывания фосфат-ионов в вивианит, растворимость которого чрезвычайно мала в отсутствие сульфатов и сульфат-редуцирующих бактерий. Вивианит образуется на поверхности глинистых микроагрегатов взвешенной фракции наносов, которая со временем (2–3 года) удаляется потоком, что приводит к снижению масштабов воздействия пожара.

Работа проводилась при поддержке научного проекта Российского Фонда Фундаментальных Исследований № 19-55-80022 «Влияние урбанизации и наводнений на химическое загрязнение крупных речных бассейнов (на примере Амура)».

Литература

1. Canadell J.G., Pataki D.E., Pitelka L.F. (Eds.). Terrestrial ecosystems in a changing world. – Springer Science & Business Media, 2007.
2. Zhou Y., Xing X., Lang J., Chen D., Cheng S., Wei L., Wei X., Liu C. A comprehensive biomass burning emission inventory with high spatial and temporal resolution in China // Atmos. Chem. Phys. – 2017. – vol. 17. – P. 2839–2864. doi: 10.5194/acp-17-2839-2017.
3. Huang X., Li M., Li J., Song Y. A high-resolution emission inventory of crop burning in fields in China based on MODIS thermal anomalies/fire products // Atmos. Environ. – 2012. – 50. – P. 9–15. doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.01.017.
4. Burling I.R., Yokelson R.J., Akagi S.K., Urbanski S., Wold C., Griffith D.W.T., Johnson T.J., Reardon J., Weise D.R. Airborne and ground-based measurements of the trace gases and particles emitted by prescribed fires in the United States // Atmos. Chem. Phys. – 2011. – vol. 11. – P. 12197–12216.
5. Sun L., Hu H., Guo Q., L X. Estimating carbon emissions from forest fires during 1980 to 1999 in Daxing'an Mountain, China // Afr. J. Biotech. – 2011. – vol. 10, iss. 41. – P. 8046–8053.

6. Vivchar A.V., Moiseenko K.B., Pankratova N.V. Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in Northern Eurasia for air quality assessment and climate modeling // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* – 2010. – vol. 46, iss. 3. – P. 281–293.
7. Kukavskaya E.A., Soja A.J., Petkov A.P., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Conard S.G., Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Can. J. For. Res.* – 2012. – vol. 43, iss. 5. – P. 493–506. doi: 10.1139/cjfr-2012-0367.
8. Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V. Influence of ground and peat fires on CO₂ emissions into the atmosphere // *Dokl. Earth Sc.* – 2014. – vol. 459. – P. 1565–1569. doi: 10.1134/S1028334X14120034.
9. Ribeiro K., Pacheco F.S., Ferreira J.W., de Sousa-Neto E.R., Hastie A., Krieger F.G.C., Alvalá P.C., Forti M.C., Ometto J.P. Tropical peatlands and their contribution to the global carbon cycle and climate change // *Glob. Chang. Biol.* – 2021. – vol. 27, iss. 3. – P. 489–505. doi: 10.1111/gcb.15408.
10. Korontzi S., McCarty J., Justice C. Monitoring agricultural burning in the Mississippi River valley region from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) // *J. Air Waste Manag. Assoc.* – 2008. – vol. 58, iss. 9. – P. 1235–1239. doi: 10.3155/1047-3289.58.9.1235.
11. McCarty J., Krylov A., Prishchepov A., Banach D., Tyukavina A., Potapov P., Turubanova S. Agricultural fires in European Russia, Belarus, and Lithuania and their impact on air quality, 2002–2012 // Gutman, G., Radeloff, V. (Eds.), *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*. – Springer International Publishing, Switzerland, 2017. – P. 193–221. doi: 10.1007/978-3-319-42638-9_9.
12. Gutman G., Radeloff V. Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991 // Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-42638-9.
13. Li J., Li Y., Bo Y., Xie S., 2016. High-resolution historical emission inventories of crop residue burning in fields in China for the period 1990–2013 // *Atmos. Environ.* – 2016. – vol. 138. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.05.002.
14. Барталев С.А. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.Ю. Ефремов, Е.А. Лупян, Ф.В. Стыценко, Е.В. Флитман // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2012. – том 9, № 2. – С. 9-26.
15. Romanenkov V., Rukhovich D., Koroleva P., McCarty J. Estimating black carbon emissions from agricultural burning, in: Mueller, L., Saporov, A., Lischeid, G. (Eds.). *Novel measurement and assessment tools for monitoring and management of land and water resources in agricultural landscapes of Central Asia* // *Environmental Science and Engineering*, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-01017-5_20.
16. Tan Z., Tieszen L.L., Zhu Z., Liu S., Howard S.M. An estimate of carbon emissions from 2004 wildfires across Alaskan Yukon River Basin // *Carbon Balance Manag.* – 2007. – vol. 2, iss. 12. doi: 10.1186/1750-0680-2-12.
17. Kusangaya S., Sithole V.B., 2015. Remote sensing-based fire frequency mapping in a savannah rangeland // *S. Afr. J. Geomat.* – 2015. – vol. 4, iss. 1.
18. Ostroukhov A.V., Klimina E.M. Survey of Middle Amur lowland terrain transformations based on remote sensing data. Proceedings of joint symposium on tropical peatland restoration 2018 // *Responsible Management of Tropical Peatland following up to The Jakarta Declaration Jakarta, February 2018*. – IKAPI, Bogor, Indonesia, 2018. – P. 123–129.
19. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства. Блок мониторинга пожарной опасности // (режим доступа: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml) дата обращения: 09.02.2021.
20. Minshall G.W., Robinson C.T., Royer T.V. Stream Ecosystem Responses to the 1988 Wildfires // *Yellowstone Science. Summer*. – 1998. – P. 15-22.
21. Украинцев А.В., Воздействие лесных пожаров на состояние рек Заиграевского района Республики Бурятия / А.В. Украинцев, А.М. Плюсин, М.К. Чернявский // *Водные ресурсы*. – 2019. – том 46, № 1. – С. 14-23. doi: 10.31857/S0321-059646114-23.
22. Bayley S.E., Schindler D.W., Beaty K.G. Effects of multiple fires on nutrient yields from streams draining boreal forest and fen watersheds: nitrogen and phosphorus // *Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sciences*. – 1992. – vol. 29. – P. 584-596.

23. Fu Y., Li R., Wang X., Bergeron Y., Valeria O., Chavardès R.D., Wang Y., Hu J. Fire detection and fire radiative power in forests and low-biomass lands in Northeast Asia: MODIS versus VIIRS Fire Products // *Remote Sens.* – 2020. – vol. 12 (18), iss. 2870. doi: 10.3390/rs12182870.
24. Salvoldi M., Siaki G., Sprintsin M., Karnieli A. Burned area mapping using multi-temporal Sentinel-2 data by applying the relative differenced aerosol-free vegetation index (RdAFRI) // *Remote Sens.* – 2020. – vol. 12, 17, iss. 2753. doi: 10.3390/rs12172753.
25. Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Zhang X., Wang G., Yin R. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine // *Remote Sens.* – 2019. – vol. 11, iss. 489.
26. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Uvarov I. Multiyear circumpolar assessment of the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-VEGETATION // *Intern. J. Remote Sens.* – 2007. – vol. 28, iss. 6. – P. 1397–1404. doi: 10.1080/01431160600840978.
27. Шешуков М.А., Савченко А.П., Пешков В.В. Лесные пожары и борьба с ними на севере Дальнего Востока. – Хабаровск: Кн. изд-во, 1992. – 96 с.
28. Kharitonova G.V., Shein E.V., Krutikova V.O., Ostrouhov A.V., Kharitonov E.V. (2019) Secondary carbonates in edaphic components of ecosystems // *Soil Physics, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 368. – IOP Publishing, 2019. doi:10.1088/1755-1315/368/1/012020.
29. Sheingauz A. 1996. The role of fire in forest cover, structure, and dynamics in the Russian Far East // Goldammer I.G., Furyaev V.V. (Eds.) *Fire in ecosystems of Boreal Eurasia*, 1996. – P. 186–190.
30. Леса Дальнего Востока. – М.: Лесная промышленность, 1969. – 392 с.
31. Argañaraz J., Gavier-Pizarro G., Zak M., Bellis L. Fire regime, climate, and vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina // *Fire Ecol.* – 2015. – vol. iss. 11. – P. 55–73. doi: 10.4996/fireecology.1101055.
32. Fire Information for Resource Management System (FIRMS) (режим доступа: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>) дата обращения: 09.02.2021.
33. García-Lázaro J.R., Moreno-Ruiz J.A., Riaño D., Arbelo M. Estimation of burned area in the northeastern Siberian boreal forest from a Long-Term Data Record (LTDR) 1982–2015 time series // *Remote Sensing.* – 2018. – vol. 10, iss. 6. – P. 940. doi: 10.3390/rs10060940.
34. Ying L., Shen Z., Yang M., Piao S. Wildfire detection probability of MODIS fire products under the constraint of environmental factors: A study based on confirmed ground wildfire records // *Remote Sens.* – 2019. – vol. 11, iss. 24. – P. 3031. doi: 10.3390/rs11243031.
35. Карта природных пожаров России в 2020 году. 2021. Greenpeace, (режим доступа: <https://greenpeace.ru/news/2021/04/06/greenpeace-podschital-ploshhad-vseh-landshaftnyh-pozharov-v-rossii-v-2020-godu/>) дата обращения: 09.02.2021.
36. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Хабаровского края за 2019 год. 2020. (режим доступа: <https://mpr.khabkrai.ru/?menu=getfile&id=8149>) дата обращения: 20.05.2021.
37. Urbanski S.P., Wei Min Hao, Stephen B. Chemical Composition of Wildland Fire Emissions // *Developments in Environmental Science*. Bytnerowicz A., Arbaugh M., Riebau A., Andersen C. (Eds), 2009. – vol. 8. – P. 79–107. doi: 10.1016/S1474-8177(08)00004-1.
38. Nunes J.P., Doerr S.H., Sheridan G., Neris J., Santín C., Emelko M.B., Silins U., Robichaud P.R., Elliot W.J., Keizer J. Assessing water contamination risk from vegetation fires: Challenges, opportunities and a framework for progress // *Hydrological Processes.* – 2018. – vol. 32(5). – P. 687–694. doi: 10.1002/hyp.11434.
39. Rothe M., Frederichs T., Eder M., Kleeberg A., Hupfer M.: Evidence for vivianite formation and its contribution to long-term phosphorus retention in a recent lake sediment: a novel analytical approach // *Biogeosciences.* – 2014. – vol. 11. – P. 5169–5180. doi: 10.5194/bg-11-5169-2014.
40. Rothe M., Kleeberg A., Hupfer M. The occurrence, identification and environmental relevance of vivianite in waterlogged soils and aquatic sediments // *Earth-Science Reviews.* – 2016. – vol. 158. – P. 51–64. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.04.008.
41. Zhiyao Tang, Wenting Xu, Guoyi Zhou, Yongfei Bai, Jiaxiang Li, Xuli Tang, Dima Chen, Qing Liu, Wenhong Ma, Gaoming Xiong, Honglin He, Nianpeng He, Yanpei Guo, Qiang Guo, Jiangling Zhu, Wenxuan Han, Huifeng Hu, Jingyun Fang, Zongqiang Xie Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems // *PNAS.* – 2018. – vol. 115(16). – P. 4033–4038. doi:10.1073/pnas.1700295114.

42. Kharitonova G.V., Ostroukhov A.V., Tyugai Z.N., Kruticova V.O. Labile Components of Bottom Sediments in the Simmi River (Bolon State Nature) // *Moscow University Soil Science Bulletin*. – 2020. – vol. 75 (4-5). – P. 168-175. doi: 10.3103/S0147687420040043.

43. Kharitonova G.V., Ostroukhov A.V., Tyugai Z.N., Kruticova V.O. Impact of fires on eutrophication in rivers (the Simmy River, the Bolon Nature Reserve) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/895/1/012014.

References

1. Canadell J.G., Pataki D.E., Pitelka L.F. (Eds.). *Terrestrial ecosystems in a changing world*. – Springer Science & Business Media, 2007.

2. Zhou Y., Xing X., Lang J., Chen D., Cheng S., Wei L., Wei X., Liu C. A comprehensive biomass burning emission inventory with high spatial and temporal resolution in China // *Atmos. Chem. Phys.* – 2017. – vol. 17. – P. 2839–2864. doi: 10.5194/acp-17-2839-2017.

3. Huang X., Li M., Li J., Song Y. A high-resolution emission inventory of crop burning in fields in China based on MODIS thermal anomalies/fire products // *Atmos. Environ.* – 2012. – 50. – P. 9–15. doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.01.017.

4. Burling I.R., Yokelson R.J., Akagi S.K., Urbanski S., Wold C., Griffith D.W.T., Johnson T.J., Reardon J., Weise D.R. Airborne and ground-based measurements of the trace gases and particles emitted by prescribed fires in the United States // *Atmos. Chem. Phys.* – 2011. – vol. 11. – P. 12197–12216.

5. Sun L., Hu H., Guo Q., L.X. Estimating carbon emissions from forest fires during 1980 to 1999 in Daxing'an Mountain, China // *Afr. J. Biotech.* – 2011. – vol. 10, iss. 41. – P. 8046–8053.

6. Vivchar A.V., Moiseenko K.B., Pankratova N.V. Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in Northern Eurasia for air quality assessment and climate modeling // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* – 2010. – vol. 46, iss. 3. – P. 281–293.

7. Kukavskaya E.A., Soja A.J., Petkov A.P., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Conard S.G., Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Can. J. For. Res.* – 2012. – vol. 43, iss. 5. – P. 493–506. doi: 10.1139/cjfr-2012-0367.

8. Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V. Influence of ground and peat fires on CO₂ emissions into the atmosphere // *Dokl. Earth Sc.* – 2014. – vol. 459. – P. 1565–1569. doi: 10.1134/S1028334X14120034.

9. Ribeiro K., Pacheco F.S., Ferreira J.W., de Sousa-Neto E.R., Hastie A., Krieger F.G.C., Alvalá P.C., Forti M.C., Ometto J.P. Tropical peatlands and their contribution to the global carbon cycle and climate change // *Glob. Chang. Biol.* – 2021. – vol. 27, iss. 3. – P. 489–505. doi: 10.1111/gcb.15408.

10. Korontzi S., McCarty J., Justice C. Monitoring agricultural burning in the Mississippi River valley region from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) // *J. Air Waste Manag. Assoc.* – 2008. – vol. 58, iss. 9. – P. 1235–1239. doi: 10.3155/1047-3289.58.9.1235.

11. McCarty J., Krylov A., Prishchepov A., Banach D., Tyukavina A., Potapov P., Turubanova S. Agricultural fires in European Russia, Belarus, and Lithuania and their impact on air quality, 2002–2012 // Gutman, G., Radeloff, V. (Eds.), *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*. – Springer International Publishing, Switzerland, 2017. – P. 193–221. doi: 10.1007/978-3-319-42638-9_9.

12. Gutman G., Radeloff V. *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991* // Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-42638-9.

13. Li J., Li Y., Bo Y., Xie S., 2016. High-resolution historical emission inventories of crop residue burning in fields in China for the period 1990–2013 // *Atmos. Environ.* – 2016. – vol. 138. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.05.002.

14. Bartalev S.A. Ocenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovykh dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ / S.A. Bartalev, V.A. Egorov, V.YU. Efremov, E.A. Lupyan, F.V. Styckenko, E.V. Flitman // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. – 2012. – tom 9, № 2. – S. 9-26.

15. Romanenkov V., Rukhovich D., Koroleva P., McCarty J. Estimating black carbon emissions from agricultural burning, in: Mueller, L., Saporov, A., Lischeid, G. (Eds.). *Novel measurement and assessment tools for monitoring and management of land and water resources in agricultural landscapes of Central Asia* // *Environmental Science and Engineering*, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-01017-5_20.

16. Tan Z., Tieszen L.L., Zhu Z., Liu S., Howard S.M. An estimate of carbon emissions from 2004 wildfires across Alaskan Yukon River Basin // *Carbon Balance Manag.* – 2007. – vol. 2, iss. 12. doi: 10.1186/1750-0680-2-12.
17. Kusangaya S., Sithole V.B., 2015. Remote sensing-based fire frequency mapping in a savannah rangeland // *S. Afr. J. Geomat.* – 2015. – vol. 4, iss. 1.
18. Ostroukhov A.V., Klimina E.M. Survey of Middle Amur lowland terrain transformations based on remote sensing data. Proceedings of joint symposium on tropical peatland restoration 2018 // *Responsible Management of Tropical Peatland following up to The Jakarta Declaration* Jakarta, February 2018. – IKAPI, Bogor, Indonesia, 2018. – P. 123–129.
19. Informacionnaya sistema distancionnogo monitoringa Federal'nogo agentstva lesnogo hozyajstva. Blok monitoringa pozharnoj opasnosti // (rezhim dostupa: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml) data obrashcheniya: 09.02.2021.
20. Minshall G.W., Robinson C.T., Royer T.V. Stream Ecosystem Responses to the 1988 Wildfires // *Yellowstone Science*. Simmer. – 1998. – R. 15-22.
21. Ukrainev A.V., Vozdejstvie lesnyh pozharov na sostoyanie rek Zairaevskogo rajona Respubliki Buryatii / A.V. Ukrainev, A.M. Plyusnin, M.K. Chernyavskij // *Vodnye resursy.* – 2019. – tom 46, № 1. – S. 14-23. doi: 10.31857/S0321-059646114-23.
22. Bayley S.E., Schindler D.W., Beaty K.G. Effects of multiple fires on nutrient yields from streams draining boreal forest and fen watersheds: nitrogen and phosphorus // *Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sciences.* – 1992. – vol. 29. – R. 584-596.
23. Fu Y., Li R., Wang X., Bergeron Y., Valeria O., Chavardès R.D., Wang Y., Hu J. Fire detection and fire radiative power in forests and low-biomass lands in Northeast Asia: MODIS versus VIIRS Fire Products // *Remote Sens.* – 2020. – vol. 12 (18), iss. 2870. doi: 10.3390/rs12182870.
24. Salvoldi M., Siaki G., Sprintsin M., Karnieli A. Burned area mapping using multi-temporal Sentinel-2 data by applying the relative differenced aerosol-free vegetation index (RdAFRI) // *Remote Sens.* – 2020. – vol. 12, 17, iss. 2753. doi: 10.3390/rs12172753.
25. Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Zhang X., Wang G., Yin R. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine // *Remote Sens.* – 2019. – vol. 11, iss. 489.
26. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Uvarov I. Multiyear circumpolar assessment of the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-VEGETATION // *Intern. J. Remote Sens.* – 2007. – vol. 28, iss. 6. – P. 1397–1404. doi: 10.1080/01431160600840978.
27. SHeshukov M.A., Savchenko A.P., Peshkov V.V. Lesnye pozhary i bor'ba s nimi na severe Dal'nego Vostoka. – Habarovsk: Kn. izd-vo, 1992. – 96 s.
28. Kharitonova G.V., Shein E.V., Krutikova V.O., Ostrouhov A.V., Kharitonov E.V. (2019) Secondary carbonates in edaphic components of ecosystems // *Soil Physics, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 368. – IOP Publishing, 2019. doi:10.1088/1755-1315/368/1/012020.
29. Sheingauz A. 1996. The role of fire in forest cover, structure, and dynamics in the Russian Far East // Goldammer I.G., Furyaev V.V. (Eds.) *Fire in ecosystems of Boreal Eurasia*, 1996. – P. 186–190.
30. Lesa Dal'nego Vostoka. – M.: Lesnaya promyshlennost', 1969. – 392 s.
31. Argañaraz J., Gavier-Pizarro G., Zak M., Bellis L. Fire regime, climate, and vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina // *Fire Ecol.* – 2015. – vol. iss. 11. – P. 55–73. doi: 10.4996/fireecology.1101055.
32. Fire Information for Resource Management System (FIRMS) (rezhim dostupa: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>) data obrashcheniya: 09.02.2021.
33. García-Lázaro J.R., Moreno-Ruiz J.A., Riaño D., Arbelo M. Estimation of burned area in the northeastern Siberian boreal forest from a Long-Term Data Record (LTDR) 1982–2015 time series // *Remote Sensing.* – 2018. – vol. 10, iss. 6. – P. 940. doi: 10.3390/rs10060940.
34. Ying L., Shen Z., Yang M., Piao S. Wildfire detection probability of MODIS fire products under the constraint of environmental factors: A study based on confirmed ground wildfire records // *Remote Sens.* – 2019. – vol. 11, iss. 24. – P. 3031. doi: 10.3390/rs11243031.
35. Karta prirodnih pozharov Rossii v 2020 godu. 2021. Greenpeace, (rezhim dostupa: <https://greenpeace.ru/news/2021/04/06/greenpeace-podschital-ploshhad-vseh-landshaftnyh-pozharov-v-rossii-v-2020-godu/>) data obrashcheniya: 09.02.2021.

36. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii i ohrane okruzhayushchej sredy Habarovskogo kraya za 2019 god. 2020. (rezhim dostupa: <https://mpr.khabkrai.ru/?menu=getfile&id=8149>) data obrashcheniya: 20.05.2021.
37. Urbanski S.P., Wei Min Hao, Stephen B. Chemical Composition of Wildland Fire Emissions // *Developments in Environmental Science*. Bytnerowicz A., Arbaugh M., Riebau A., Andersen C. (Eds), 2009. – vol. 8. – P. 79–107. doi: 10.1016/S1474-8177(08)00004-1.
38. Nunes J.P., Doerr S.H., Sheridan G., Neris J., Santín C., Emelko M.B., Silins U., Robichaud P.R., Elliot W.J., Keizer J. Assessing water contamination risk from vegetation fires: Challenges, opportunities and a framework for progress // *Hydrological Processes*. – 2018. – vol. 32(5). – P. 687–694. doi: 10.1002/hyp.11434.
39. Rothe M., Frederichs T., Eder M., Kleeberg A., Hupfer M.: Evidence for vivianite formation and its contribution to long-term phosphorus retention in a recent lake sediment: a novel analytical approach // *Biogeosciences*. – 2014. – vol. 11. – P. 5169–5180. doi: 10.5194/bg-11-5169-2014.
40. Rothe M., Kleeberg A., Hupfer M. The occurrence, identification and environmental relevance of vivianite in waterlogged soils and aquatic sediments // *Earth-Science Reviews*. – 2016. – vol. 158. – P. 51–64. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.04.008.
41. Zhiyao Tang, Wenting Xu, Guoyi Zhou, Yongfei Bai, Jiaxiang Li, Xuli Tang, Dima Chen, Qing Liu, Wenhong Ma, Gaoming Xiong, Honglin He, Nianpeng He, Yanpei Guo, Qiang Guo, Jiangling Zhu, Wenxuan Han, Huifeng Hu, Jingyun Fang, Zongqiang Xie Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems // *PNAS*. – 2018. – vol. 115(16). – P. 4033–4038. doi:10.1073/pnas.1700295114.
42. Kharitonova G.V., Ostroukhov A.V., Tyugai Z.N., Kruticova V.O. Labile Components of Bottom Sediments in the Simmi River (Bolon State Nature) // *Moscow University Soil Science Bulletin*. – 2020. – vol. 75 (4-5). – P. 168-175. doi: 10.3103/S0147687420040043.
43. Kharitonova G.V., Ostroukhov A.V., Tyugai Z.N., Kruticova V.O. Impact of fires on eutrophication in rivers (the Simmy River, the Bolon Nature Reserve) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/895/1/012014.

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

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

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

Требования к содержанию статей

Научные направления:

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

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

УДК проставляется в научной библиотеке.

Аннотация: Композиционно построена по принципу IRMAD (Introduction, Methods, Results and Discussion): Актуальность, цели и задачи исследования. Как проводилось исследование, какие методы использовались. Основные выводы, результаты исследования; каковы перспективы исследования, направления дальнейшей работы. Объем аннотации не менее 100 слов. Разделы «Хроника» и «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 40x50 мм и не более 120x170 мм. К рисунку прилагается подрисуночный текст, в который содержит указания размерности приведенных на рисунке величин.

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

Предоставление статей в редакцию

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

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

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

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

Окончательное решение о публикации статьи принимает редколлегия.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

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

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

Сетевое научное периодическое издание

1(25) 2022

Технический редактор *А.Н. Егорова*
Компьютерная верстка *Л.М. Винокурова*
Оформление обложки *П.И. Антипин*
Подписано в печать 30.03.2022. Формат 70х108/16.
Дата выхода в свет 30.03.2022.