

DOI: 10.21055/0370-1069-2021-2-100-107

УДК: 616.98:578.824.11(571.55)

И.Д. Зарва¹, М.В. Павлов², А.А. Сороковой², А.Д. Ботвинкин¹

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ БЕШЕНСТВА В ВОСТОЧНОМ ЗАБАЙКАЛЬЕ

¹ФГБОУ ВО «Иркутский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Иркутск, Российская Федерация; ²ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения РАН, Иркутск, Российская Федерация

Цель – совершенствование мониторинга природных очагов бешенства на основе использования современных технологий картографического анализа. **Материалы и методы.** Проведено ретроспективное исследование по данным официальной регистрации бешенства в Забайкальском крае (Восточном Забайкалье) за 1950–2020 гг. Пространственное распространение бешенства среди животных сравнивали по двум отрезкам времени: 1972–1978 гг. (n=157) и 2014–2020 гг. (n=61). Для картографирования использованы программы QGIS 3.16.0, ArcMap 10.8.1, ArcScene 10.8.1 и электронные ландшафтно-географические карты мира Natural Earth, OpenStreetMap. На картограммах выделены анализируемые территориальные единицы (АТЕ), привязанные к градусной сетке (0,5° × 0,5°). Связь локализации случаев бешенства с элементами ландшафта оценивали статистически, сравнивая благополучные и неблагополучные АТЕ. **Результаты и обсуждение.** Установлены различия в ландшафтной приуроченности эпизоотий бешенства в Восточном Забайкалье в разные периоды времени. До 1983 г. преобладало бешенство собак, и эпизоотии распространялись за пределы лесостепной зоны. С 1984 по 2013 год бешенство среди животных не регистрировалось. В 2014–2020 гг. лисицы (*Vulpes vulpes*) служили основным источником вируса бешенства. Площадь эпизоотии сократилась более чем в два раза в сравнении с 1972–1978 гг. Основные проявления бешенства наблюдались на стыке равнинных и горных, степных и лесных участков. Неблагополучные по бешенству АТЕ отличались более выраженной вариабельностью элементов ландшафта. Выявлены вероятные пути трансграничного распространения вируса бешенства. Обсуждена связь особенностей распространения бешенства в Восточном Забайкалье в 1950–2020 гг. с генетическими вариантами вируса, изменениями климата, миграциями животных и антропогенными факторами. Результаты исследования предлагается использовать для корректировки программ барьерной оральной вакцинации лисиц.

Ключевые слова: бешенство, ГИС, дистанционное зондирование, Центральная Азия.

Корреспондирующий автор: Ботвинкин Александр Дмитриевич, e-mail: botvinkin_ismu@mail.ru.

Для цитирования: Зарва И.Д., Павлов М.В., Сороковой А.А., Ботвинкин А.Д. Применение ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования Земли для оценки пространственно-временного распространения бешенства в Восточном Забайкалье. *Проблемы особо опасных инфекций*. 2021; 2:100–107. DOI: 10.21055/0370-1069-2021-2-100-107

Поступила 26.01.2021. Отправлена на доработку 18.02.2021. Принята к публ. 09.04.2021.

I.D. Zarva¹, M.V. Pavlov², A.A. Sorokovoi², A.D. Botvinkin¹

Application of GIS and Earth Remote Sensing Data for the Evaluation of the Spatiotemporal Spread of Rabies in Eastern Trans-Baikal Region

¹Irkutsk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Irkutsk, Russian Federation;

²V.B. Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The aim of the study was to improve monitoring of natural foci of rabies based on the use of modern technologies of cartographic analysis. **Materials and methods.** A retrospective study was carried out on the data of official registration of rabies in the Trans-Baikal Territory (Eastern Trans-Baikal Region) for 1950–2020. The spatial spread of rabies among animals was compared for two time periods: 1972–1978 (n=157 cases) and 2014–2020 (n=61 cases). Software packages QGIS 3.16.0, ArcMap 10.8.1, ArcScene 10.8.1 and electronic landscape-geographical maps of the world “Natural Earth”, “OpenStreetMap” were used for the mapping. Analyzed territorial units (ATUs) tied to a degree grid (0,5° × 0,5°) were marked on the cartograms. The interdependence between the localization of rabies cases and landscape elements was assessed statistically, comparing between the rabies free and the rabies affected ATUs. **Results and discussion.** Differences in the landscape confinedness of rabies epizootics in Eastern Trans-Baikal Region at different periods of time have been established. Until 1983, dog rabies prevailed, and epizootics spread beyond the forest-steppe zone. In 1984–2013 rabies among animals was not recorded. In 2014–2020 red foxes (*Vulpes vulpes*) were the main source of the rabies virus. The area of the epizootic has more than halved in comparison with 1972–1978. The main manifestations of rabies were observed at the junction of lowland and mountainous, steppe and forest areas. The rabies affected ATUs were characterized by more pronounced landscape variables. Possible routes of cross-border spread of the rabies virus have been identified. The connection between the features of the spatiotemporal spread of rabies and genetic variants of the virus, climate change, animal migrations and anthropogenic factors in Eastern Trans-Baikal Region in 1950–2020 is discussed. The results of the study are proposed to be used to adjust the programs for barrier oral vaccination of the foxes.

Key words: rabies, GIS, Earth remote sensing, Central Asia.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Funding: This work was financially supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-315-90004/19.

Acknowledgments: The authors are grateful to I.A. Korotkova for providing the data on rabies cases in 2020.

Corresponding author: Alexander D. Botvinkin, e-mail: botvinkin_ismu@mail.ru.

Citation: Zarva I.D., Pavlov M.V., Sorokovoi A.A., Botvinkin A.D. Application of GIS and Earth Remote Sensing Data for the Evaluation of the Spatiotemporal Spread of Rabies in Eastern Trans-Baikal Region. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii [Problems of Particularly Dangerous Infections]*. 2021; 2:100–107. (In Russian). DOI: 10.21055/0370-1069-2021-2-100-107

Received 26.01.2021. Revised 18.02.2021. Accepted 09.04.2021.

Zarva I.D., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4225-5998>

Pavlov M.V., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2749-0153>

Sorokovoi A.A., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8987-7068>

Botvinkin A.D., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0920-1330>

Новые технологии регистрации объектов и процессов на поверхности Земли, в сочетании с возможностями современных геоинформационных систем (ГИС), сегодня служат одним из наиболее эффективных инструментов при изучении пространственно-временных закономерностей распространения инфекционных болезней [1–3]. Новые научные знания используются при разработке систем эпидемиологического надзора, прогнозов и программ борьбы с природно-очаговыми инфекциями [4]. Актуальность применения ГИС-технологий для осуществления надзора за бешенством определяется высокой подвижностью границ очаговых территорий и необходимостью определения на местности приоритетных участков для проведения противоэпизоотических мероприятий, в том числе оральной вакцинации диких плотоядных [5–6].

Многолетние материалы, накопленные по Забайкальскому природному очагу бешенства, определили выбор территории для исследования. Интенсивные эпизоотии в Читинской области в 1950–1980 гг. с преобладанием собак в качестве источника инфекции сопровождалась многочисленными заболеваниями людей [7]. Последний случай у человека зарегистрирован в 1983 г., и в дальнейшем Восточное Забайкалье многие годы считалось благополучной по бешенству территорией [8]. В 2014 г. бешенство вернулось в Забайкальский край, пред-

положительно после трансграничного заноса дикими животными с территории Монголии и Китайской Народной Республики [9, 10]. Опубликованы карты распространения бешенства в Забайкалье за разные периоды [7, 9, 11], и сохранились исходные данные для них. Таким образом, представилась возможность для сравнительного анализа пространственной динамики эпизоотий, разделенных продолжительным межэпизоотическим периодом. **Цель** исследования – совершенствование мониторинга природных очагов бешенства на основе использования современных технологий картографического анализа. С помощью ГИС выполнена оценка степени территориального совпадения эпизоотий бешенства в 1972–1978 гг. и 2014–2020 гг., их ландшафтной приуроченности и вероятных путей трансграничного заноса бешенства.

Материалы и методы

Проведен ретроспективный эпидемиологический анализ данных ветеринарной и санитарно-эпидемиологической служб о регистрации бешенства за 1950–2020 гг. Характеристика распространения бешенства среди людей и различных групп животных представлена по периодам с наиболее высокими показателями заболеваемости (табл. 1). Картографирование случаев бешенства животных

Таблица 1 / Table 1

Число случаев бешенства в Забайкальском крае и структура заболеваемости по группам животных в годы максимальных подъемов заболеваемости в прошлом и во время текущей эпизоотии (в скобках 95 % ДИ)

The number of rabies cases and structure of morbidity by animal groups during the years of maximum incidence in the past and during the current epizooty in the Trans-Baikal Territory (in brackets 95 % CI)

Показатели заболеваемости Case rate and proportion	Сравниваемые периоды Compared periods		
	1953–1957	1973–1977	2014–2020
Число случаев у людей Number of human cases	19	18	0
Число случаев у животных Number of animal cases	493	768	99
Собаки и кошки (доля, %) Dogs and cats (share, %)	53,6 (49,2–58,0)	47,0 (43,5–50,5)	4,0 (0,1–7,9)
Сельскохозяйственные животные (доля, %) Cattle (share, %)	46,2 (41,8–50,6)	49,5 (46,0–53,0)	68,7 (59,6–77,8)
Дикие животные (доля, %) Wild animals (share, %)	0,2 (0,12–0,28)*	3,5 (2,2–4,7)**	27,3 (18,6–36,0)**

Примечания: * – волк (*Canis lupus*); ** – в основном лисицы (*Vulpes vulpes*), редко – корсак (*V. corsac*), волк (*C. lupus*) и др.

Notes: * – wolf (*Canis lupus*); ** red fox (*Vulpes vulpes*), mainly; corsac fox (*V. corsac*), wolf (*C. lupus*) and others, occasionally

выполнено по двум отрезкам времени: 1972–1978 гг. ($n=157$) и 2014–2020 гг. ($n=61$). Проведена сплошная выборка случаев заболевания бешенством, для которых имелась возможность определить географические координаты. Точки регистрации бешенства сопоставлены с открытыми данными дистанционного зондирования Земли. Для пространственного анализа использованы программы QGIS 3.16.0, ArcMap 10.8.1, ArcScene 10.8.1 и электронные ландшафтно-географические карты мира Natural Earth, OpenStreetMap. Контурные земель сельскохозяйственного назначения приведены по [12]. На картах с помощью внутренних инструментов программы QGIS 3.16.0 (географическая система координат GSC WGS 84 EPSG:4326) обозначены анализируемые территориальные участки (АТЕ), привязанные к градусной сетке по Т.Ю. Каримовой и В.М. Неронову [13]. Выделение границ очагов бешенства в разные периоды проведено по контурам АТЕ, в которых зарегистрированы заболевания животных. Для анализа связи пространственного распространения текущей эпизоотии (2014–2020 гг.) с особенностями ландшафта сформированы три группы сравнения по 25 АТЕ в каждой: участки с проявлениями бешенства (группа А); участки, расположенные за пределами очаговой территории по ее периметру на севере (группа В) и на юге, вдоль государственной границы (группа С) (рис. 1). Элементы ландшафта, по которым проводилось сравнение: лесные угодья и сельскохозяйственные земли (доля от площади АТЕ), населенные пункты (количество), гидрографическая сеть (количество рек), характер рельефа (количество изолиний с диапазоном 250 м). Статистическую связь распределения случаев бешенства с элементами естественного и антропогенного ландшафта оценивали с помощью таблиц сопряженности и критерия χ^2 , сравнивая попарно участки группы А с участками групп В и С. Средние величины приведены с 95 % доверительными интервалами (95 % ДИ). Коэффициент корреляции Спирмена использовали для оценки связи числа случаев бешенства в АТЕ в разные периоды времени.

Результаты и обсуждение

В 1950–2020 гг. наиболее значительные подъемы заболеваемости бешенством наблюдались в середине 50-х и 70-х гг. прошлого столетия и в 2014–2020 гг. Причины этих подъемов и многолетнего перерыва (1984–2013 гг.) в регистрации бешенства точно не установлены.

В 1953–1957 гг. более половины всех случаев выявлено у домашних плотоядных (собак и кошек), бешенство лисиц (*Vulpes vulpes*) не регистрировалось. В 1973–1977 гг. собаки оставались основным источником инфекции, но в распространении бешенства отмечено участие лисиц и корсаков (*Vulpes corsac*). В 2014–2020 гг. резко возросла доля заболевших диких животных, а домашние плотоядные стали играть незначительную роль в распространении бешенства. Бешенство кошек регистрировалось эпизодически во все периоды. Эпизоотия бешенства в 2014–2020 гг. по интенсивности, структуре заболевших животных и заболеваемости людей значительно отличалась от эпизоотий 50-х и 70-х гг. прошлого столетия (табл. 1).

Картографическому анализу подвергнуты данные по эпизоотии 2014–2020 гг. природного типа, с доминированием лисицы в качестве источника инфекции, и смешанной эпизоотии в 1972–1978 гг., с преобладанием домашних собак среди заболевших животных. В 1972–1978 гг. заболевания бешенством зарегистрированы в 55 АТЕ, во время текущей эпизоотии – только в 25 АТЕ. Несмотря на эти различия, отмечена прямая заметная корреляционная связь распределения случаев по АТЕ в разные периоды времени ($r=0,57$; $p=0,0001$). Участки, неблагоприятные по бешенству в разные периоды, частично перекрывались (рис. 2): 88,0 % АТЕ, в которых в 2014–2020 гг. зарегистрированы заболевания бешенством, были неблагоприятными и в прошлом, но только 40,0 % АТЕ, неблагоприятных в 1972–1978 гг., территориально совпали с границами эпизоотии 2014–2020 гг. В 1972–1978 гг. бешенство домашних плотоядных выявлялось в 76,4 % неблагоприятных АТЕ, бешен-

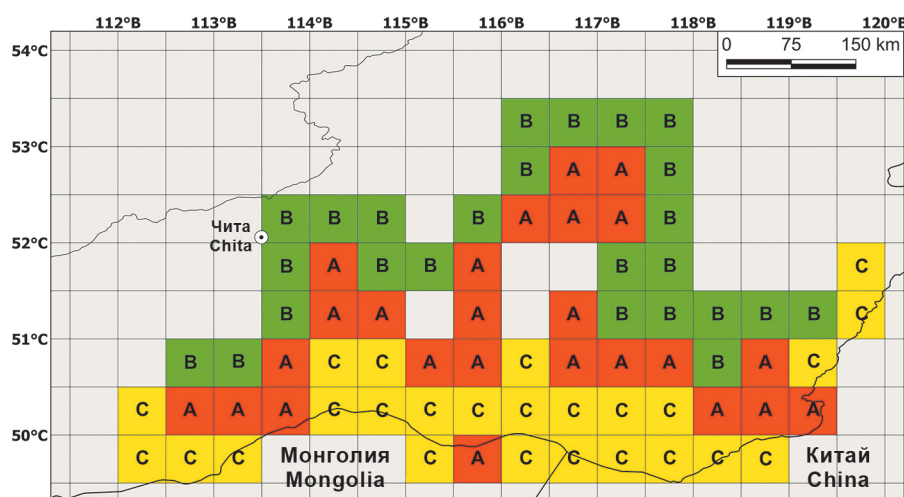


Рис. 1. Схема пространственного анализа эпизоотии бешенства в Восточном Забайкалье в 2014–2020 гг.:

А – неблагоприятные по бешенству АТЕ; В – благоприятные по бешенству АТЕ по северному и С – то же по южному периметрам неблагоприятной территории

Fig. 1. Scheme for spatial analysis of rabies epizooty in Eastern Trans-Baikal Region in 2014–2020:

А – rabies affected ATUs; В – rabies free ATUs along the northern and С – along the southern perimeters of the rabies affected area

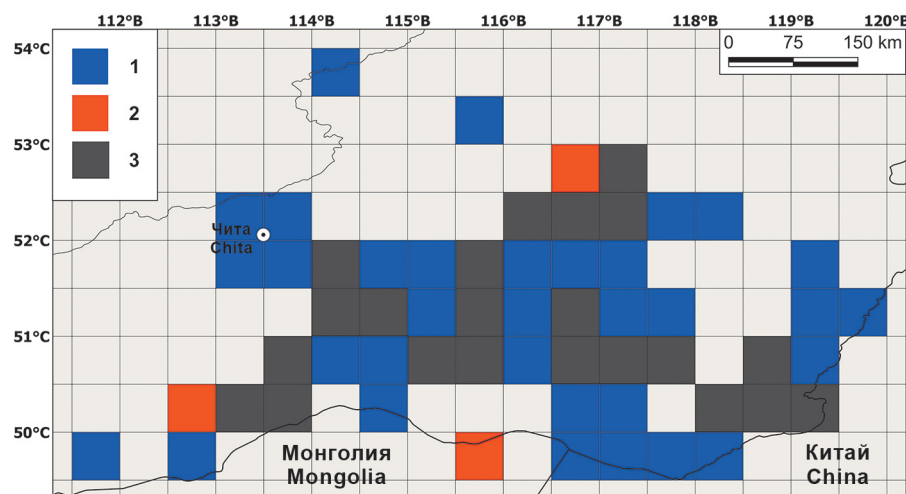


Рис. 2. Пространственное распространение бешенства в Восточном Забайкалье в разные периоды времени:

1 – неблагоприятные АТЕ в 1972–1978 гг.; 2 – неблагоприятные АТЕ в 2014–2020 гг.; 3 – неблагоприятные АТЕ в оба периода

Fig. 2. Spatial distribution of rabies in Eastern Trans-Baikal Region at different periods of time:

1 – rabies affected ATUs in 1972–1978; 2 – rabies affected ATUs in 2014–2020; 3 – rabies affected ATUs during both periods

ство диких животных – в 21,8 %; в 2014–2020 гг. эти показатели составили 52 и 96 % соответственно. Доля АТЕ, в которых зарегистрированы заболевания сельскохозяйственных животных, изменилась меньше всего (60 и 76 %).

При визуальной оценке картограмм за разные периоды времени прослеживается связь бешенства с безлесными территориями и гидрографической сетью (рис. 3–4). Точки регистрации бешенства располагались преимущественно по периферии безлесных участков, по бортам речных долин и межгорных депрессий; значительно реже – на участках с монотонным плоским рельефом. Горный рельеф широко распространен в Забайкалье, но все случаи бешенства локализованы на участках до 1000 м н.у.м. Более подробно проанализированы особенности ландшафтного распределения бешенства в 2014–2020 гг. Основная часть заболеваний бешенством зарегистрирована в АТЕ, в которых имелись земли сельскохозяйственного назначения (рис. 4). В этот период сокращение площади эпизоотии произошло в основном за счет АТЕ, покрытых лесом более чем на 25 %. Сокращение числа АТЕ с проявлениями бешенства отмечено также в степи вблизи государственной границы на участке от 114° до 118° в.д.

В результате статистической обработки установлено, что территория, вовлеченная в эпизоотию в

2014–2020 гг., отличалась более выраженным разнообразием элементов ландшафта в сравнении с благополучными по бешенству участками (табл. 2). АТЕ с зарегистрированными случаями бешенства характеризовались неоднородностью растительного покрова (сочетание леса и безлесных участков), наличием рек, пересеченным рельефом, а пахотных земель и населенных пунктов здесь было больше, чем на соседних участках. Среднее количество населенных пунктов в пересчете на одну АТЕ в зоне эпизоотии составило 9,36 (7,83–10,8) против 5,28 (4,08–6,48) на благополучных участках на юге (группа С) и 6,0 (4,12–7,88) на севере (группа В).

На участках, расположенных по северному периметру неблагоприятной по бешенству территории, увеличивалась площадь лесных угодий, снижалась площадь сельскохозяйственных земель, горы становились выше, а речная сеть – более разветвленной. Участки по южному периметру, на которых бешенство не регистрировалось во время текущей эпизоотии, отличались отсутствием или небольшими пятнами разреженных лесов, слабо развитой речной сетью (более половины АТЕ не имели постоянных водотоков), сглаженным рельефом. Сельскохозяйственные земли широко распространены, но представлены, в основном, пастбищами и залежами. Эти особенности отчетливо проявляют себя при выборочном срав-

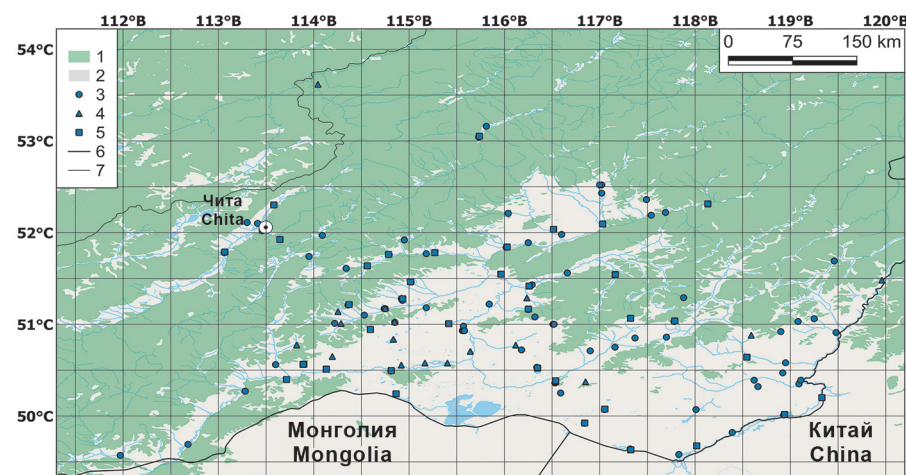


Рис. 3. Пространственное распространение бешенства в Восточном Забайкалье в 1972–1978 гг.:

1 – лесные угодья; 2 – безлесные участки; случаи бешенства: 3 – собаки и кошки; 4 – сельскохозяйственные животные; 5 – дикие животные; 6 – государственная граница; 7 – граница субъектов Российской Федерации

Fig. 3. Spatial distribution of animal rabies in the Eastern Trans-Baikal Region in 1972–1978:

1 – forest areas; 2 – bare areas; rabies cases: 3 – dogs and cats; 4 – cattle; 5 – wild animals; 6 – state border; 7 – entity border across the Russian Federation

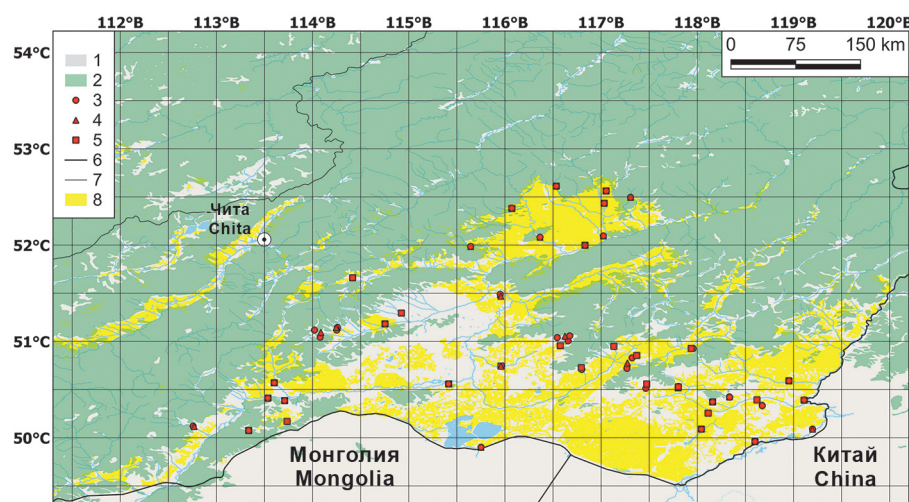


Рис. 4. Пространственное распространение бешенства в Восточном Забайкалье в 2014–2020 гг.:

1–7 – те же (см. рис. 3); 8 – земли сельскохозяйственного назначения

Fig. 4. Spatial distribution of animal rabies in the Eastern Trans-Baikal Region in 2014–2020:

1–7 – identical to fig. 3; 8 – agricultural lands

нении АТЕ по аэрокосмическим снимкам крупного масштаба.

В приграничной зоне выделяются две группы АТЕ, в которых бешенство регистрировалось в оба анализируемых периода (рис. 2). Одна из них расположена на востоке, где в 2014–2020 гг. заболевания бешенством зарегистрированы в непосредственной близости от границы с Китаем или на расстоянии до 90 км от нее (в среднем 51 км по 10 промерам). На западной окраине степей точки регистрации случаев расположены на расстоянии от 19 до 81 км (в среднем 52 км по 6 промерам) от границы с Монголией. Оба этих участка связаны с долинами крупных рек (Онон, Аргунь), которые берут начало за пределами России. Во время эпизоотии 2014–2020 гг. единственный случай бешенства на участке государственной границы между вышеобозначенными группами АТЕ выявлен в долине р. Улдэ-Гол, впадающей в Торейские озера.

В ходе исследования установлены особенности пространственного распространения бешенства в Восточном Забайкалье в 1972–1978 гг. и 2014–2020 гг. Лесостепная приуроченность очагов бешенства в этом регионе известна давно, но ранее их связь со степью, лесостепью и землями сельскохозяйственного назначения статистически оценивали в границах административных районов [7, 14]. Как показал ретроспективный анализ с помощью ГИС, значительная часть случаев бешенства среди домашних животных в 1973–1978 гг. зарегистрирована за пределами лесостепных ландшафтов (рис. 3). В 2014–2020 гг. не отмечено распространения бешенства в таежную зону, но в то же время сократилось число случаев на открытых степных участках (рис. 4). Отчетливо прослеживалась установленная ранее приуроченность проявлений «лисы» бешенства к стыкам ландшафтов и долинам рек [9, 15].

В Восточном Забайкалье численность лисицы (*V. vulpes*) на участках с гетерогенным ландшафтом выше, чем в открытой степи или горной тайге [9, 14, 16, 17]. Кроме того, бешенство лис чаще выявляли вблизи населенных пунктов после контактов

с человеком. Не исключено, что заболевания диких животных в малонаселенной степной местности на юге Забайкалья регистрировали не полностью. Эти обстоятельства следует принимать во внимание при оценке результатов картографирования по данным пассивного мониторинга.

Данные, представленные в табл. 1, свидетельствуют об изменениях в структуре источников вируса и увеличении роли лисиц в распространении бешенства после 2014 г. Это согласуется с данными о проникновении генетического варианта вируса бешенства (steppe, или «степной»), адаптированного к лисице, из Западной Сибири и Казахстана в Центральную Азию, в том числе в Забайкальский край, Бурятию [9, 10] и на сопредельные территории Монголии и Китая [18–20]. Штаммы вируса бешенства, выделенные от лисиц и корсаков в Восточном Забайкалье в 1977 г., отнесены к другому варианту – Arctic-like («подобный Арктическому») [цит. по 9]. Известно, что вирус бешенства этой генетической линии распространен на востоке Азии и способен эффективно распространяться среди собак [9, 19, 20]. По-видимому, представленные в статье картографические данные отражают распространение разных вариантов вируса, адаптированных к разным хозяевам.

В процессе выполнения работы сформулированы предположения о причинах своеобразной пространственно-временной динамики эпизоотий бешенства. Для степей Забайкалья и сопредельных районов Монголии и Китая характерны многолетние циклы чередования засушливых лет и периодов повышенного обводнения, которые сопровождаются значительными изменениями ареалов и численности животных [17]. Прекращение эпизоотий бешенства в начале 1980-х гг. совпало с экстремально засушливым периодом и резким снижением биологической продуктивности степей. Антропогенные факторы также способствовали деградации степей в этой части Забайкалья: около 20 % степей были распаханы в середине прошлого века, а позднее заброшены [16, 17]. Следы залежей с измененным рас-

Таблица 2 / Table 2

Оценка связи пространственного распространения бешенства с различными элементами природного и антропогенного ландшафта (Восточное Забайкалье, 2014–2020 гг.)
 Assessment of interdependence between the spatial distribution of rabies and various elements of the natural and anthropogenic landscape (Eastern Trans-Baikal Region, 2014–2020)

Элементы ландшафта Landscape elements	Группы АТЕ Groups of ATUs	Доля АТЕ с разными градациями элементов ландшафта, % (95 % ДИ) Share of ATUs with different gradations of landscape elements, % (95 % CI)			Сравнение группы А с группами В и С Comparison of group A with groups B and C
		++	+++	++++	
Лесные угодья Forest lands	А (бешенство есть) A (rabies affected)	24 (7,3–40,7)	32 (13,8–50,2)	44 (24,5–63,5)	
	В (бешенства нет) B (rabies free)	0	8 (0–18,6)	92 (81,4–100)	$\chi^2=13,8$; $p<0,001$
	С (бешенства нет) C (rabies free)	8 (0–26,3)	68 (49,8–76,2)	24 (7,3–40,7)	$\chi^2=6,0$; $p=0,035$
Сельскохозяйственные земли Agricultural land	А (бешенство есть) A (rabies affected)	0	36 (17,2–54,8)	64 (45,2–82,8)	
	В (бешенства нет) B (rabies free)	28 (10,4–45,6)	20 (4,4–35,6)	52 (32,4–71,6)	$\chi^2=8,4$; $p=0,015$
	С (бешенства нет) C (rabies free)	8 (0–26,3)	12 (0–24,7)	80 (64,3–95,7)	$\chi^2=6,0$; $p=0,035$
Населенные пункты Settlements	А (бешенство есть) A (rabies affected)	8 (0–26,3)	32 (13,7–50,3)	60 (40,8–79,2)	
	В (бешенства нет) B (rabies free)	44 (24,5–63,5)	12 (0–24,7)	44 (24,5–63,5)	$\chi^2=9,1$; $p=0,011$
	С (бешенства нет) C (rabies free)	20 (4,4–35,6)	60 (40,8–79,2)	20 (4,3–35,7)	$\chi^2=8,4$; $p=0,015$
Реки Rivers	А (бешенство есть) A (rabies affected)	8 (0–26,3)	24 (7,3–40,7)	68 (49,7–86,3)	
	В (бешенства нет) B (rabies free)	0	0	100	$\chi^2=9,5$; $p=0,009$
	С (бешенства нет) C (rabies free)	56 (36,6–75,4)	8 (0–26,3)	36 (17,2–54,8)	$\chi^2=13,5$; $p<0,001$
Рельеф Altitude range	А (бешенство есть) A (rabies affected)	26 (8,8–43,2)	52 (32,4–71,6)	12 (0,0–24,7)	
	В (бешенства нет) B (rabies free)	8 (0–26,3)	40 (20,8–59,2)	60 (40,8–79,2)	$\chi^2=12,8$; $p=0,002$
	С (бешенства нет) C (rabies free)	56 (36,6–75,4)	44 (24,5–63,5)	0	$\chi^2=4,2$; $p=0,120$

Примечания: * – лесные и сельскохозяйственные угодья; + угодья отсутствуют, ++ площадь угодий до 25 %, +++ более 25 % от площади АТЕ; количество населенных пунктов и рек в АТЕ: + 0–3, ++ 4–7, +++ 8 и более; рельеф – количество изолиний с диапазоном по вертикали 250 м: + 1, ++ 2, +++ 3.

Notes: * – forest and agricultural lands; + absent, ++ less than 25 % of the ATU area, +++ more than 25 % of the ATU area; the number of settlements and rivers in the ATU: + 0–3, ++ 4–7, +++ 8 or more; altitude range (number of isolines with a vertical range of 250 m): + 1, ++ 2, +++ 3.

тительным покровом заметны на аэрокосмических снимках большинства АТЕ, в которых бешенство не регистрировалось. Более детальный анализ динамики этих процессов в данном исследовании не проводился.

С начала текущего столетия в связи с изменениями климата наблюдаются сезонные миграции дзерена (*Procapra gutturosa*) из Монголии в Забайкальский край, и за стадами антилоп следуют хищники. Основные миграционные потоки приурочены к долине Онона и отрогам хребта Эрмана [16, 17]. По данным радиослежения, индивидуальные участки волков в Даурских степях распространялись на территорию соседних стран. Подвижность волков здесь в 2–3 раза превышает аналогичные параметры для лесной зоны европейской части России: зафиксированы суточные переходы на расстояние более 90 км [21]. Это согласуется с появлением бешеных волков далеко от мест их возможного заражения (координаты 119,96, 51,49 и 114,04, 53,61). За последние 10–15 лет эпизоотии бешенства среди лисиц отмечены на территории всех соседних стран [18–20]. Перечисленные наблюдения подтверждают возможность трансграничного заноса бешенства и согласуются с результатами филогенетического анализа изолятов вируса [10, 18, 20]. Детальный картографический анализ эпизоотий выполнен только для приграничных участков России; к сожалению, аналогичные сведения по соседним странам отсутствуют.

Результаты картографирования с применением ГИС позволили обозначить два наиболее вероятных направления трансграничного заноса бешенства дикими животными. Для этого использованы следующие критерии: повторяемость регистрации бешенства в разные периоды времени, выявление заболеваний бешенством вблизи государственной границы и особенности ландшафта (рис. 2, 4, табл. 2). Выраженная гетерогенность ландшафтов, сочетание степных и горно-таежных участков характерны для местности по обе стороны государственной границы на западной и восточной окраинах Даурских степей и лесостепей. По-видимому, относительно ровные степи на участке от предгорий хребта Эрмана до оз. Далайнор в современный период менее благоприятны для распространения вируса бешенства.

Опыт пространственно-временного анализа с оцифровкой накопленной информации предлагается использовать для организации борьбы с бешенством. В настоящее время для этого в Российской Федерации, кроме рутинных мероприятий, используются активный вирусологический мониторинг и оральная вакцинация лисиц. В европейской части страны барьерная оральная вакцинация осуществляется в рамках межгосударственных программ [22]. Для приграничных территорий Сибири и Дальнего Востока такой подход не менее актуален, и для его реализации необходимо картографирование проявлений бешенства на основе современных технологий.

Таким образом, применение ГИС и данных дистанционного зондирования Земли позволило визуализировать накопленные за многолетний период сведения о пространственном распространении бешенства в Восточном Забайкалье. Выявлены особенности ландшафтного распространения эпизоотий смешанного и природного типов в разные периоды времени и обозначены вероятные пути трансграничного заноса вируса бешенства.

Конфликт интересов. Авторы подтверждают отсутствие конфликта финансовых/нефинансовых интересов, связанных с написанием статьи.

Благодарности. Авторы признательны И.А. Коротковой за предоставление данных о заболеваниях бешенством в 2020 г.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект 19-315-90004/19.

Список литературы

1. Perez A., AlKhamis M., Carlsson U., Brito B., Carrasco-Medanic R., Whedbee Z., Willeberg P. Global animal disease surveillance. *Spat. Spatiotemporal Epidemiol.* 2011; 2(3):135–45. DOI: 10.1016/j.sste.2011.07.006.
2. Beard R., Wentz E., Scotch M. A systematic review of spatial decision support systems in public health informatics supporting the identification of high risk areas for zoonotic disease outbreaks. *Int. J. Health Geogr.* 2018; 17(1):38. DOI: 10.1186/S12942-018-0157-5.
3. Asrar G.R. Advances in quantitative Earth remote sensing: past, present and future. *Sensors (Basel)*. 2019; 19(24):5399. DOI: 10.3390/s19245399.
4. Попов Н.В., Куклев Е.В., Кутырев В.В. Актуальные вопросы геоинформационного обеспечения мониторинга и прогнозирования эпизоотической активности природных очагов чумы и других зоонозных инфекций на территории Российской Федерации. *Проблемы особо опасных инфекций*. 2006; 2:28–30.
5. Wheeler D.C., Waller L.A. Mountains, valleys, and rivers: The transmission of raccoon rabies over a heterogeneous landscape. *J. Agric. Biol. Environ. Stat.* 2008; 13(4):388–406. DOI: 10.1198/108571108X383483.
6. Brunker K., Lemey P., Marston D.A., Fooks A.R., Lugelo A., Ngeleja C., Hampson K., Biek R. Landscape attributes governing local transmission of an endemic zoonosis: Rabies virus in domestic dogs. *Mol. Ecol.* 2018; 27(3):773–88. DOI: 10.1111/mec.14470.
7. Савицкий В.П., Ботвинкин А.Д., Грибанова Л.Я., Мальков Г.Б., Сидоров Г.Н., Почечукин Д.И. Картографический метод в изучении эпидемиологии и эпизоотологии бешенства (по материалам Читинской области). В кн.: *Современные методы в изучении природно-очаговых инфекций*. Ленинград, 1979. С. 22–8.
8. Сидорова Д.Г., Сидоров Г.Н., Полещук Е.М., Колычев Н.М. Бешенство в Восточной Сибири в XX – начале XXI веков. *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2007; S3(55):168–72.
9. Ботвинкин А.Д., Зарва И.Д., Якович И.Д., Адельшин Р.В., Мельникова О.В., Андаев Е.И., Шульпин М.И., Чупин С.А., Метлин А.Е., Балахонов С.В., Ханжарев С.С., Лапа С.Э., Истомина Т.Ф., Короткова И.А., Шобоева Р.С., Калугин Д.В., Бахлина Н.В., Степина В.С., Аблов А.И., Коплик М.Е., Школьникова Е.Н., Щепин С.Г. Эпидемиологический анализ вспышек бешенства в Забайкалье после трансграничного заноса инфекции. *Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы*. 2019; 9(3):15–24. DOI: 10.18565/epidem.2019.9.3.15-24.
10. Yakovchits N.V., Adelshin R.V., Zarva I.D., Chupin S.A., Melnikova O.V., Andaev E.I., Shulpin M.I., Metlin A.E., Botvinkina A.D. Fox rabies outbreaks in the republic of Buryatia: Connections with neighbouring areas of Russia, Mongolia and China. *Transbound. Emerg. Dis.* 2021; 68(2):427–34. DOI: 10.1111/tbed.13692.
11. Конева И.В., Батуев А.Р., Лопаткин Д.А. Карта «Нозо-экосистемы Азиатской части России». *Известия Иркутского государственного университета*. 2011; 4(1):119–34.
12. Визуализация векторных контуров земель сельскохозяйственного назначения. Аналитический центр Минсельхоза Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <http://mcsas.ru/monitoring-zemel/kontura-poley/> (дата обращения 25.12.2020).
13. Каримова Т.Ю., Неронов В.М. Природные очаги чумы

Палеарктики. М.: Наука; 2007. 199 с.

14. Сидоров Г.Н., Савицкий В.П., Ботвинкин А.Д. Ландшафтное распределение хищных млекопитающих семейства собачьих (Canidae) как фактор формирования ареала вируса бешенства на юго-востоке СССР. *Зоологический журнал*. 1983; 62(5):761–70.

15. Адамович В.Л. Картографирование очагов бешенства в центральной части Русской равнины как метод охраны здоровых животных. В кн.: Проблемы медико-географических исследований: Материалы научного симпозиума по вопросам картографирования для целей охраны природной среды и здоровья человека. М., 1984. С. 50–103.

16. Даурская степь. [Электронный ресурс]. URL: <https://amurinfocenter.org/ecoregion/dauria-steppe> (дата обращения 25.10.2020).

17. Kirilyuk V.E., Obyazov V.A., Tkachuk T.E., Kirilyuk O.K. Influence of climate change on vegetation and wildlife in the Daurian eco-region. In: Eurasian Steppes. Ecological problems and livelihoods in a changing world. New York; London: Springer Dordrecht Heidelberg; 2012. P. 397–424.

18. Tuvshintulga B., Batmagnai E., Bazarragchaa E., Dulam P., Sugar S., Battsetseg B. Detection and molecular characterization of rabies virus in Mongolia during 2008–2010. *Int. J. One Health*. 2015; 11(26):26–31. DOI: 10.14202/IJOH.2015.26-31.

19. Wang L., Tang Q., Liang G. Rabies and rabies virus in wildlife in mainland China, 1990–2013. *Int. J. Infect. Dis.* 2014; 25:122–9. DOI: 10.1016/j.ijid.2014.04.016.

20. Tao X.Y., Li M.L., Guo Z.Y., Yan J.H., Wu Y.Z. Inner Mongolia: a potential portal for the spread of rabies to Western China. *Vector Borne Zoonotic Dis.* 2019; 19(1):51–8. DOI: 10.1089/vbz.2017.2248.

21. Кирилук В.Е., Кирилук А.В., Минаев А.Н. Участки обитания и перемещения волков в Даурских степях. *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*. 2019; 4(4):91–105. DOI: 10.24189/NCR.2019.068.

22. Shulpin M.I., Nazarov N.A., Chupin S.A., Korennoy F.I., Metlin A.E., Mischenko A.V. Rabies surveillance in the Russian Federation. *Rev. Sci. Tech.* 2018; 37(2):483–95. DOI: 10.20506/rst.37.2.2817.

References

1. Perez A., AlKhamis M., Carlsson U., Brito B., Carrasco-Medanic R., Whedbee Z., Willeberg P. Global animal disease surveillance. *Spat. Spatiotemporal Epidemiol.* 2011; 2(3):135–45. DOI: 10.1016/j.sste.2011.07.006.

2. Beard R., Wentz E., Scotch M. A systematic review of spatial decision support systems in public health informatics supporting the identification of high risk areas for zoonotic disease outbreaks. *Int. J. Health Geogr.* 2018; 17(1):38. DOI: 10.1186/S12942-018-0157-5.

3. Asrar G.R. Advances in quantitative Earth remote sensing: past, present and future. *Sensors (Basel)*. 2019; 19(24):5399. DOI: 10.3390/s19245399.

4. Popov N.V., Kouklev E.V., Kutyrev V.V. [Relevant issues of geo-informational support to provide for monitoring and prognostication of epizootic activity in natural foci of plague and other zoonotic infections in the territory of the Russian Federation]. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii [Problems of Particularly Dangerous Infections]*. 2006; 2:28–30.

5. Wheeler D.C., Waller L.A. Mountains, valleys, and rivers: The transmission of raccoon rabies over a heterogeneous landscape. *J. Agric. Biol. Environ. Stat.* 2008; 13(4):388–406. DOI: 10.1198/108571108x383483.

6. Brunker K., Lemey P., Marston D.A., Fooks A.R., Lugelo A., Ngeleja C., Hampson K., Biek R. Landscape attributes governing local transmission of an endemic zoonosis: Rabies virus in domestic dogs. *Mol. Ecol.* 2018; 27(3):773–88. DOI: 10.1111/mec.14470.

7. Savitsky V.P., Botvinkin A.D., Gribanova L.Ya., Mal'kov G.B., Sidorov G.N., Pochevkin D.I. [A cartographic method in studying the epidemiology and epizootiology of rabies (based on materials for the Chita region)]. In: [Modern Methods of Studying Natural-Focal Infections]. Leningrad; 1979. P. 22–8.

8. Sidorova D.G., Sidorov G.N., Poleshchuk E.M., Kolychev N.M. [Rabies in Eastern Siberia in the XX – early XXI centuries]. *Acta Biomedica Scientifica. Bulletin of the East-Siberian Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2007; 3(55):168–72.

9. Botvinkin A.D., Zarva I.D., Yakovchits I.D., Adel'shin R.V., Me'lnikova O.V., Andae E.I., Shul'pin M.I., Chupin S.A., Metlin A.E., Balakhonov S.V., Khankhareev S.S., Lapa S.E., Istomina T.F., Korotkova I.A., Shoboeva R.S., Kalugin D.V., Bakhilina N.V., Stepina V.S., Ablov A.I., Koplik M.E., Shkol'nikova E.N., Shchepin S.G. [Epidemiological analysis of rabies outbreaks in the Trans-Baikal Region after trans-boundary import of infection]. *Epidemiologiya i Infektsionnye Bolezni. Aktualnye Voprosy. [Epidemiology and Infectious Diseases. Current Items]*. 2019; 9(3):15–24. DOI: 10.18565/epid.2019.9.3.15-24.

10. Yakovchits N.V., Adel'shin R.V., Zarva I.D., Chupin S.A., Melnikova O.V., Andae E.I., Shulpin M.I., Metlin A.E., Botvinkin A.D. Fox rabies outbreaks in the republic of Buryatia: Connections with neighbouring areas of Russia, Mongolia and China. *Transbound. Emerg. Dis.* 2021; 68(2):427–34. DOI: 10.1111/tbed.13692.

11. Koneva I.V., Batuev A.R., Lopatkin D.A. [The map Nozoeosystems of the Asian part of Russia]. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta [News of the Irkutsk State University]*. 2011; 4(1):119–34.

12. [Visualization of vector outlines of agricultural lands. Analytical Center of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation]. (Cited 25 Dec 2010). [Internet]. Available from: <http://mexac.ru/monitoring-zemel/kontura-poley/>.

13. Karimova T.Yu., Neronov V.M. [Natural plague foci of the Palaearctic]. Moscow: "Nauka". 2007. 199 p.

14. Sidorov G.N., Savitsky V.P., Botvinkin A.D. [Landscape distribution of carnivorous canine mammals (Canidae) as a factor in the formation of rabies nosoal in the southeast of the USSR]. *Zoologicheskii Zhurnal [Zoological Journal]*. 1983; 62(5):761–70.

15. Adamovich V.L. [Mapping of rabies foci in the central part of the Russian Plain as a method of animal health protection]. In: [Problems of medico-geographical research: Materials of the scientific symposium on mapping for the protection of the natural environment and human health]. Moscow; 1984. P. 50–103.

16. [Daurian Steppes]. (Cited 5 Dec 2020). [Internet]. Available from: <https://amurinfocenter.org/ecoregion/dauria-steppe>.

17. Kirilyuk V.E., Obyazov V.A., Tkachuk T.E., Kirilyuk O.K. Influence of climate change on vegetation and wildlife in the Daurian eco-region. In: Eurasian Steppes. Ecological problems and livelihoods in a changing world. New York; London: Springer Dordrecht Heidelberg; 2012. P. 397–424.

18. Tuvshintulga B., Batmagnai E., Bazarragchaa E., Dulam P., Sugar S., Battsetseg B. Detection and molecular characterization of rabies virus in Mongolia during 2008–2010. *Int. J. One Health*. 2015; 11(26):26–31. DOI: 10.14202/IJOH.2015.26-31.

19. Wang L., Tang Q., Liang G. Rabies and rabies virus in wildlife in mainland China, 1990–2013. *Int. J. Infect. Dis.* 2014; 25:122–9. DOI: 10.1016/j.ijid.2014.04.016.

20. Tao X.Y., Li M.L., Guo Z.Y., Yan J.H., Wu Y.Z. Inner Mongolia: a potential portal for the spread of rabies to Western China. *Vector Borne Zoonotic Dis.* 2019; 19(1):51–8. DOI: 10.1089/vbz.2017.2248.

21. Kirilyuk V. E., Kirilyuk A. V., Minaev A. N. [Areas of habitation and movement of wolves in the Daurian steppes]. *Nature Conservation Research. Zapovednaya Nauka [Nature Conservation Research]*. 2019; 4(4):91–105. DOI: 10.24189/ncr.2019.068

22. Shulpin M.I., Nazarov N.A., Chupin S.A., Korennoy F.I., Metlin A.E., Mischenko A.V. Rabies surveillance in the Russian Federation. *Rev. Sci. Tech.* 2018; 37(2):483–95. DOI: 10.20506/rst.37.2.2817.

Authors:

Zarva I.D., Botvinkin A.D. Irkutsk State Medical University. 1, Krasnogo Vosstaniya St., Irkutsk, 664003, Russian Federation. E-mail: ivan_zarva@mail.ru.

Pavlov M.V., Sorokovoi A.A. V.B. Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch of RAS. 1, Ulan-Batorskaya St., Irkutsk, 664033, Russian Federation. E-mail: geomer@irigs.irk.ru.

Об авторах:

Зарва И.Д., Ботвинкин А.Д. Иркутский государственный медицинский университет. Российская Федерация, 664003, Иркутск, ул. Красного Восстания, 1. E-mail: ivan_zarva@mail.ru.

Павлов М.В., Сороковой А.А. В.Б. Сочавы Сибирского отделения РАН, Российская Федерация, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1. E-mail: geomer@irigs.irk.ru.