

## Геофизические исследования при организации и обслуживании региональной сети мониторинга мерзлоты в ЯНАО

*А. Н. Шейн<sup>1,2\*</sup>, Г. Н. Краев<sup>1</sup>, Камнев Я.К.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», г. Салехард, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: a.n.shein@yandex.ru

**Аннотация.** В работе описаны результаты применения геофизических методов для организации и обслуживания региональной сети мониторинга мерзлоты в ЯНАО. Научным центром изучения Арктики в 2021 г использовался метод электротомографии для выбора мест заложения термометрической скважины. Подтверждена состоятельность и необходимость использования геофизических методов для поиска массивов мерзлых пород вблизи границы сплошного и прерывистого распространения вечной мерзлоты с глубоким залеганием кровли. Георадиолокация применялась на площадке CALM R53 в качестве вспомогательного инструмента определения мощности сезонно-талого слоя. Показано, что комплексирование геофизических методов и традиционных измерений мерзлотным шупом при изучении СТС в сложных литологических условиях необходимо для уточнения и дополнения данных.

**Ключевые слова:** мерзлота, сезонно-талый слой, электротомография, георадиолокация

## Geophysical research for organization and service of the regional permafrost monitoring network in the Yamalo-Nenets Autonomous District

*A. N. Shein<sup>1,2\*</sup>, G. N. Kraev<sup>1</sup>, Ya. K. Kamnev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Arctic Research Center of the Yamalo-Nenets Autonomous District, Salekhard, Russian Federation

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS,  
Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: a.n.shein@yandex.ru

**Abstract.** The results of the application of geophysical methods for the organization and maintenance of the regional permafrost monitoring network in the Yamalo-Nenets Autonomous District are described in the paper. Arctic Research Center in 2021 used the method of electrical resistivity tomography to determine the locations of the thermometric well. The consistency and necessity of using geophysical methods to search permafrost with deep top near the border of continuous and discontinuous permafrost zone is confirmed. Ground-penetrating radar was used at the CALM R53 site as an additional tool for determining the thickness of active layer. It is shown that the complex of geophysical methods and traditional measurements with a permafrost probe when studying the active layer in hard lithological conditions is necessary to refine and supplement the data.

**Keywords:** permafrost, active layer, electrical resistivity tomography, ground-penetrating radar

## ***Введение***

Большее четверти верхнего слоя земной коры Северного полушария находится в мёрзлом состоянии. Многолетнемёрзлые породы (ММП) в России занимают 60–65% территории или 11 млн. км<sup>2</sup> [1, 2]. Сегодня российская Арктика развивается быстрыми темпами, при этом для строительства и дальнейшей эксплуатации капитальных объектов используются устаревшие нормы и правила [3–5]. Эта проблема в немалой степени затрагивает южную часть Ямало-Ненецкого автономного округа, где находится граница сплошного и прерывистого распространения вечной мерзлоты. Согласно недавним оценкам, сделанным независимо исследователями из Финляндии, США и России, к 2050 году зона сплошной вечной мерзлоты переместится на 300–500 км к северу, что приведет к массовым разрушениям [6–8]. В целях разработки своевременного плана адаптации Администрация Ямало-Ненецкого округа инициировала ряд мероприятий, направленных на сбор информации о текущем состоянии и динамике вечной мерзлоты как в естественных условиях, так и в рамках инфраструктуры [9–10]. В ЯНАО создаётся сеть регионального мониторинга мерзлоты. Новые температурные скважины бурятся на участках, где уже проводились измерения в 60–70 годы XX века. Таким образом, мы получим изменение температуры вечной мерзлоты за 50 лет.

Помимо оборудования термометрических скважин региональная сеть мониторинга включает площадки CALM для мониторинга сезонно-талого слоя (СТС) – международная программа CALM (Circumpolar Activelayer Monitoring), направлена на сбор и систематизацию информации о реальных изменениях криолитозоны в различных ландшафтных условиях [11; 12].

Стоит отметить, что вблизи границы сплошного и прерывистого распространения вечной мерзлоты в ЯНАО её кровля может опускаться до 8–10 м, а СТС зачастую превышает 1,5 м. Всё это осложняет как выбор место для бурения термометрических скважин, так и места заложения площадок CALM и последующий мониторинг СТС. В связи с этим активно применяются современных геофизические методы для организации и обслуживания сети мониторинга мерзлоты. В работе приводятся исследования, проведённые Научным центром изучения Арктики в 2021 г, где использовался метод электротомографии для выбора мест заложения термометрической скважины, а георадиолокация – в качестве вспомогательного инструмента определения СТС.

### ***Методика и результаты применения метода электротомографии***

На двух участках вблизи г. Лабытнанги при заложении термометрических скважин LBT-3/21 и LBT-4/21 проведены исследования методом электротомографии для определения кровли ММП и выбора оптимального места бурения. Измерения выполнены многоэлектродной электроразведочной станцией «Скала-48» (совместная разработка ИНГГ СО РАН и ООО «КБ Электрометрии»), которая поочерёдно коммутирует и опрашивает различные комбинации электродов. Измерения проводились по стандартной методике [13–14]. Использовались 2

установки: Шлюмберже – чувствительная к горизонтальным границам и дипольно-осевая установка – чувствительная к вертикальным границам. Межэлектродный шаг составлял 5 м, что позволило достигнуть глубинности свыше 30 м. С учётом того, что планировались 15 метровые термометрические скважины, полученная глубинность соответствует поставленным задачам.

Измеренные профильные данные обрабатываются совместно – решается обратная двумерная задача (двумерная инверсия данных) с помощью специальных программ (например, Res2Dinv, ZondRes2D и другие).

В результате проведённых измерений построены по два геоэлектрических разреза на каждой точке (рис. 1-2, А – установка Шлюмберже, Б – дипольно-осевая установка). На всех разрезах наблюдается схожая картина по сопротивлению: до 6-7 метров наблюдаются проводящие, вероятно, талые породы, с сопротивлением от 10 до 100 Ом·м; ниже залегают более высокоомные до 2 кОм·м, предположительно мёрзлые породы.

Построенные геоэлектрические разрезы позволяют определить наиболее благоприятные места для заложения геотермометрических скважин, где по данным геофизических измерений с наибольшей вероятностью может присутствовать мерзлота на проектных глубинах.

На профиле LBT-3/21 по результатам измерений установкой Шлюмберже (рис. 1Б) определились 2 участка, где кровля высокоомных пород поднимается до глубин 6-7 м. Это участки 50-80 м и 140-170 м. Однако при повторных измерениях и инверсии полученных данных дипольно-осевой установкой был получен геоэлектрический разрез (рис. 1А), который позволил отбраковать участок 50-80 м и было рекомендовано заложить скважину на 155 м профиля.

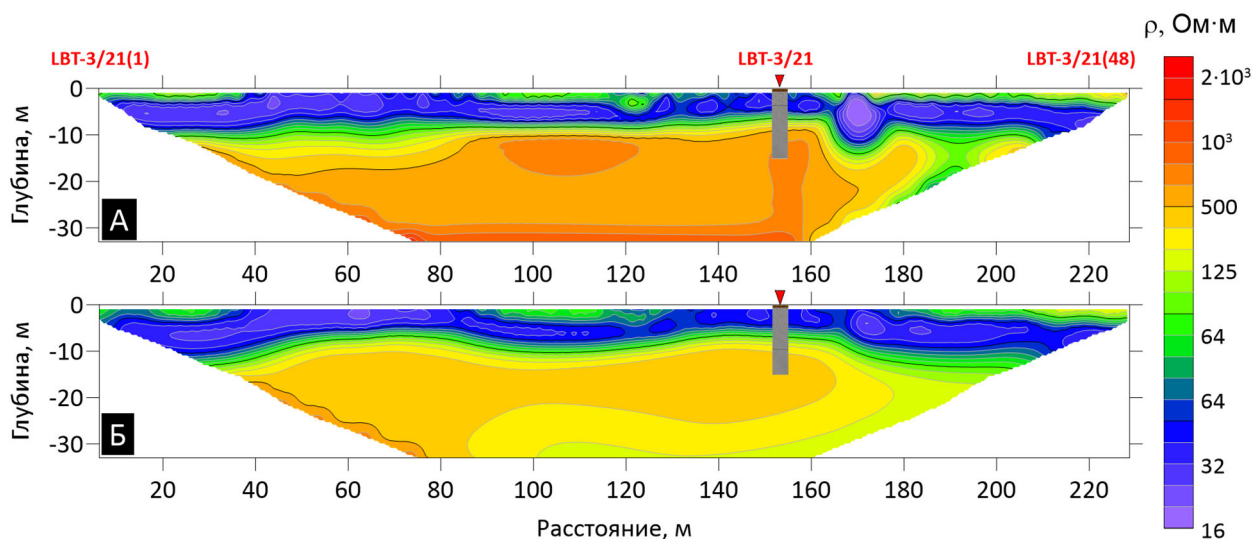


Рис. 1 Геоэлектрические разрезы по профилю LBT-3/21, полученные в результате измерений дипольно-осевой установкой (А) и Шлюмберже (Б)

На профиль LBT-4/21 по результатам измерений установкой Шлюмберже (рис. 2Б), также как и в первом случае, определились 2 участка, где кровля высо-

коомных пород поднимается до глубин 8-9 м. Это участки 40-80 м и 135-160 м. Разрез, полученный при измерениях дипольно-осевой установкой (рис. 2А) позволил отбраковать участок 40-80 м и было рекомендовано заложить скважину на 142 м профиля.

Рекогносцировочные работы методом электрофотографии в окрестностях Лабытнанги позволили выбрать места заложения термометрических скважин. При бурении в рекомендованных геофизическими исследованиями точках LBT-3/21 и LBT-4/21 подтвердилась мерзлота на глубине 12.5 м и 7 м соответственно. Таким образом подтверждается состоятельность и необходимость использования геофизических методов для поиска массивов мерзлых пород вблизи границы сплошного и прерывистого распространения вечной мерзлоты, где она может иметь островное распространение, и широко развиты мерзлые породы с глубоким залеганием кровли, не сливающиеся с сезонно-мерзлыми горизонтами.

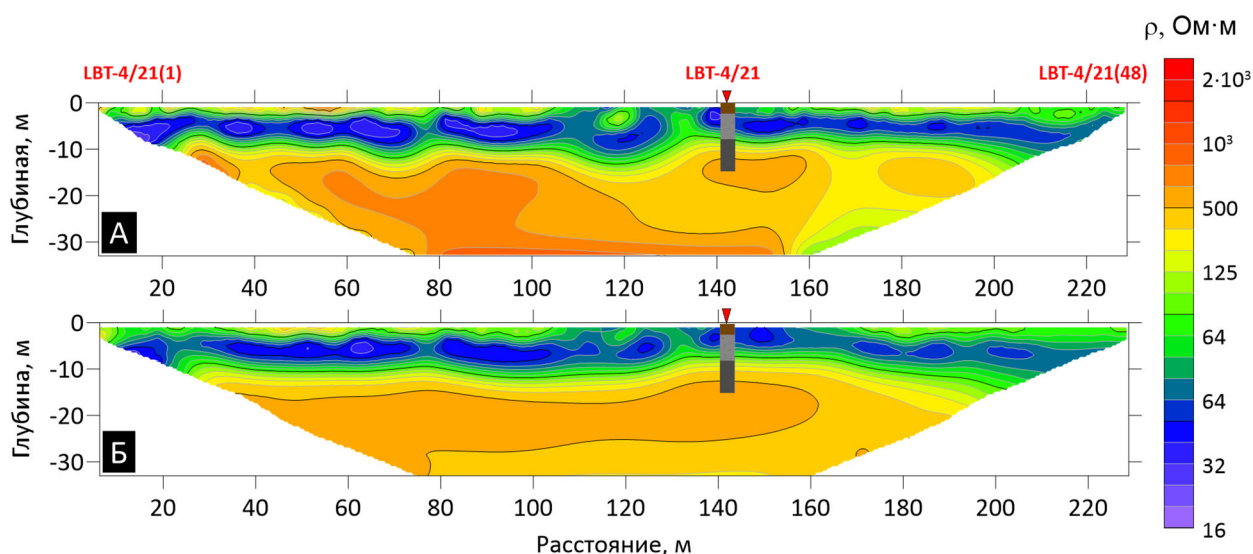


Рис. 2 Геоэлектрический разрез по профилю LBT-4/21, полученные в результате измерений дипольно-осевой установкой (А) и Шлumberже (Б)

### *Методика и результаты применения метода георадиолокации*

В соответствии со стандартами международной программы CALM наблюдения за глубиной протаивания на площадке размерами 100 м×100 м проводятся мерзлотным щупом с шагом измерений через 10 м [11]. Суммарно сетка наблюдений содержит 121 точку (рис. 3).

Исследования методом ГРЛ выполнялось по сети профилей (через каждые 10 м) по направлению восток-запад (рис. 3). Используемая аппаратура: георадарный комплекс «ОКО-2» с антенной с центральной частотой 400 МГц обладает глубиной от 1 м до 5 м, в зависимости от проводимости и степени поглощения подстилающей среды. В результате профильных измерений полученные радарограммы обрабатывались в программе GeoScan32.

Перед началом измерений выставлялись следующие настройки прибора: длительность временной развёртки – 100 нс, накопление – 16, диэлектрическая проницаемость среды – 12. Перемещение прибора осуществлялось волоком. Пройденное расстояние фиксировалось с помощью мерного колеса.

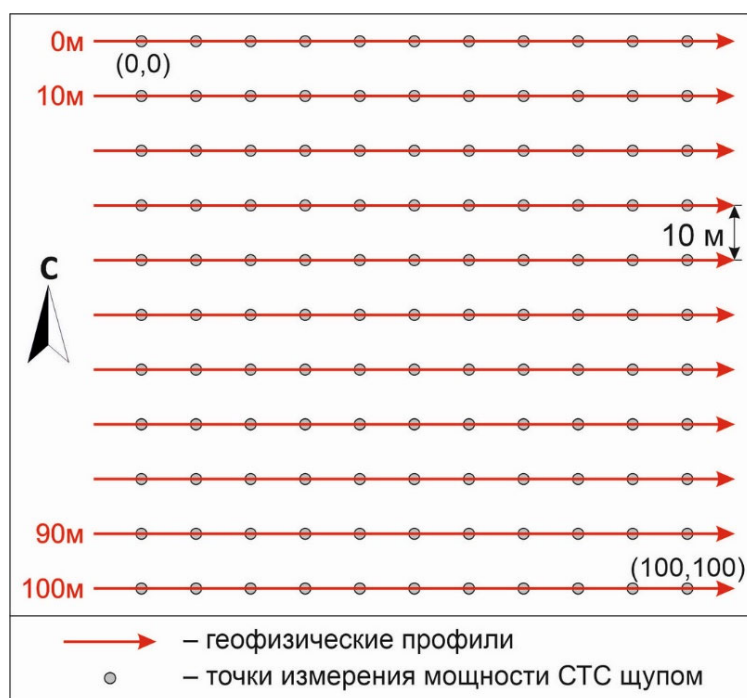


Рис. 3 Схемы фактического материала на площадке CALM R53

Приведём пример совместного применения метода ГРЛ и мерзлотного щупа на площадке CALM R53 расположенной вблизи п. Харп [15]. На данной площадке верхняя часть разреза сложена глинами, суглинками и мелким обломочным материалом (гравий). Такое строение осложняет исследование как стандартной методикой – мерзлотным щупом (галька препятствует прохождению), так и геофизическими методами (сигнал георадар быстро затухает). Поэтому комплексирование различных подходов при изучении СТС в таких условиях крайне необходимо для уточнения данных: данные, полученные щупом, помогут определить диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon$ ) и, наоборот, георадарные данные можно использовать чтобы уточнять/дополнять данные, полученные щупом. Для этого по соседним точкам измерений щупом, где уверенно определяется глубина сезонного оттаивания, нужно определить диэлектрическую проницаемость грунтов. Прослеживая границу отражения на радарограммах, установить глубину протаивания мерзлоты и скорректировать оставшиеся пункты измерения.

Описанным выше способом проводилась корректировка данных, полученных мерзлотным щупом. Данные, полученные щупом, позволили определить диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon$ ) пород, которая варьировалась на площадке от 10 до 20. Такие значения  $\epsilon$  соответствуют строению верхней части разреза на площадке CALM R53, который сложен влажными суглинками.

После определения диэлектрической проницаемости, данные полученные щупом наносились на радарограммы (рис. 4, красные ромбы), после чего глубина оттаивания корректировалась и дополнялась в недостающих пунктах (рис. 4, зелёные ромбы), где не удалось определить кровлю мерзлоты щупом. В результате проведённой корректировки средняя глубина СТС в 2021 г. увеличилась на 2 см и составила 99 см.

Таким образом, комплексирование геофизических методов и традиционных измерений щупом при изучении СТС в сложных литологических условиях необходимо для уточнения данных. Кроме того, отработка комплексной методики мониторинга СТС может существенно снизить трудозатраты при исследованиях на площадках CALM.

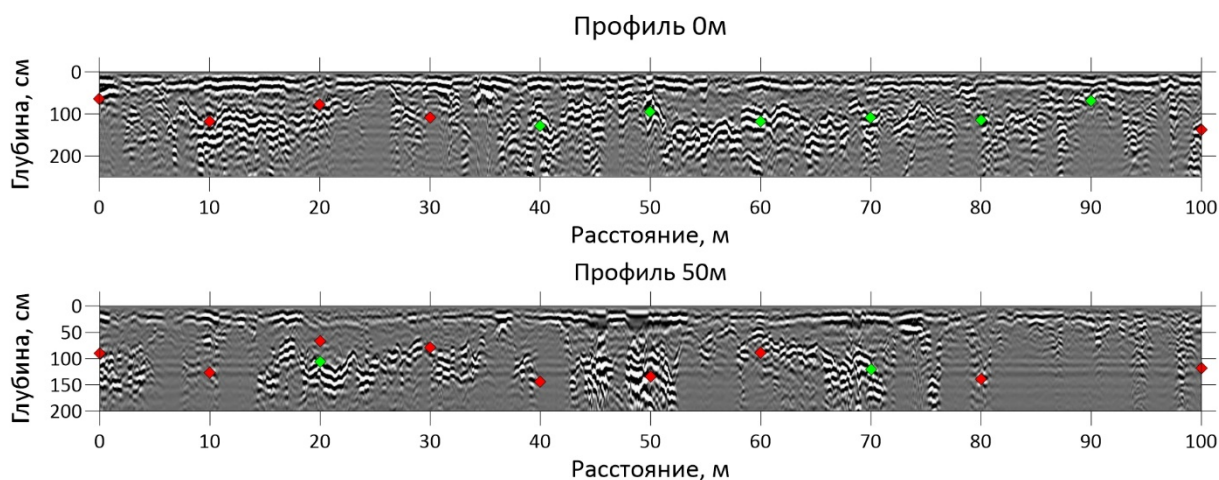


Рис. 4 - Радарограммы, полученные на площадке CALM R53 в 2021 г. по профилям 0 м и 50 м. Красные ромбы – кровля ММП, полученная щупом, зелёные ромбы – откорректированная глубина оттаивания по радарограммам

### *Заключение*

Показана эффективность геофизических методов для организации и обслуживания региональной сети мониторинга мерзлоты в ЯНАО.

Подтверждена состоятельность и необходимость использования метода электротомографии для поиска массивов мерзлых пород вблизи границы сплошного и прерывистого распространения вечной мерзлоты, где она имеет островное распространение, и широко развиты мерзлые породы с глубоким залеганием кровли, не сливающиеся с сезонно-мерзлыми горизонтами.

Комплексирование геофизических методов и традиционных измерений щупом при изучении СТС в сложных литологических условиях крайне необходимо для уточнения данных. Кроме того, отработка комплексной методики мониторинга СТС может существенно снизить трудозатраты при исследованиях на площадках CALM.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brown J., Ferrians Jr, O.J., Heginbottom J.A. and Melnikov E.S. (1997). Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Reston, VA: US Geological Survey. – 1997. – P. 45.
2. Brown J., Ferrians, Heginbottom J.A. and Melnikov E. (2002). Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. [online]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, DOI: 10.7265/skbg-kf16. (Accessed 15 Feb. 2021).
3. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659326> (дата обращения 15.03.2022 г.)
4. Постановление Госстроя РФ от 27.09.2003 N 170 «Об утверждении Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда» [Электронный ресурс] / КонсультантПлюс: <http://www.consultant.ru/> URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_44772/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_44772/) (дата обращения 15.03.2022)
5. Шеин, А. Н. Обзор научных и производственных работ по изучению многолетнемёрзлых пород в естественных и антропогенных условиях / А. Н. Шеин, Я. К. Камнев // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2020. – № 3(108). – С. 42–50. DOI: 10.26110/ARCTIC.2020.108.3.007
6. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I. and Grebenets, V.I. Changes of foundation bearing capacity due to climate warming in Northwest Siberia // *Earth Cryosphere*. – 2012. – Vol. 16(1). – P. 22-32. (in Russian with English summary).
7. Streletskiy, D. A., Suter, L. J., Shiklomanov, N. I., Porfiriev, B. N., and Eliseev, D. O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // *Environmental Research Letters*. – 2019. – 14(2). – 025003, DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6.
8. Hjort, J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky, V.E., Nelson F.E., Bernd Etzelmüller and Luoto M. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // *Nature communications*. – 2018. – 9 (1). – P. 1-9. DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4.
9. Громадский А.Н. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномёрзлых грунтов под зданиями г. Салехард / А.Н. Громадский, С.В. Арефьев, Н.Г. Волков, Я.К. Камнев, А.И. Синицкий // Научный вестник ЯНАО. – 2019. – №3. – С. 17–21. DOI: 10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003
10. Kamnev Y.K., Filimonov M.Y., Shein A.N., Vaganova N.A. Automated Monitoring The Temperature Under Buildings With Pile Foundations In Salekhard (Preliminary Results). *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*. 0; <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-021>
11. Brown J., Hinkel K. M., and Nelson F. E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: Research designs and initial results // *Polar Geography*. – 2000. – Vol. 24. – № 3. – 258 p.
12. Klene, A.E., Nelson, F.E., Shiklomanov, N.I. The N-factor in natural landscapes: variability of air and soil-surface temperatures, Kuparuk River basin, Alaska, USA // *Arctic, Antarctic and Alpine Res.* – 2001. – № 33. – P. 140–148.
13. Бобачев А.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации / А.А. Бобачев, А.А. Горбунов, И.Н. Модин, В.А. Шевнин // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 2. – С. 14–17.
14. Балков Е.В. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн, А. К. Манштейн, В. А. Белобородов // Геофизика. – 2012. – № 6. – С. 54–63.
15. Камнев Я.К., Синицкий А.И., Гребенец В.И., Петров Б.В. Создание площадки для мониторинга глубины сезонно-талого слоя вблизи п. Харп // Научный вестник ямало-ненецкого автономного округа. – 2016. – № 4(93). – С. 25-28.

© А. Н. Шеин, Г. Н. Краев, Я. К. Камнев, 2022