



GPR SURVEYS AND RPA AERIAL PHOTOGRAPHY USING IN CONDUCTING GEOCRYOLOGICAL STUDIES ON THE OKA PLATEAU IN THE EASTERN SAYAN RIDGE

S.V. Alexeev ✉, A.S. Gladkov , V.A. Pellinen , L.P. Alexeeva , A.A. Svetlakov 

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. The results of ground-penetrating radar (GPR) studies of permafrost and aerial photography, carried out at key sites in the Sentsa River valley (Oka Plateau, Eastern Sayan Ridge), are presented.

For geophysical studies, an OKO-2 GPR completed with an AB-90 shielded antenna unit was used with a maximum sounding depth of up to 20 m and a resolution of 0.5 m. To account for the landscape elevation, the Trimble TS635 tacheometer and the Leica DISTO D 510 rangefinder performed hypsometric measurements with a step of 1.0 m. Aerial photography was carried out by a remotely piloted aircraft (RPA) DJI Inspire 1 Pro, equipped with a Zenmuse 3X camera (a resolution of 3840×2160 pixels) with a spatial resolution of 5.7–7.8 cm/pixel (in different years).

In the structure of frozen lacustrine-alluvial sediments, three GPR complexes are distinguished, corresponding to the active layer and frozen rocks with different amounts of schlieren, lenses and layers of texture-forming ice. The orthophoto map and tacheometric survey analysis showed that the destruction of frost mounds occurs from the second half of April to the first half of October. The most significant relief change is due to the thawing of icy pulverescent clayey silts. It leads to subsidence blocks in the ledge of the Sentsa River terrace. Lateral river thermoerosion also contributes to the frost mounds destruction.

KEYWORDS: mountain permafrost; frost mounds; active layer; structure-forming ice; ground-penetrating radar; radarogram; RPA; aerial photography; tacheometer

FUNDING: The work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project 20-45-380002 «Cryolithozone of the Eastern Sayan Ridge: main parameters and Holocene evolution», equipment of the Center for Geodynamics and Geochronology (grant 075-15-2021-682).

SHORT COMMUNICATION

Received: December 6, 2021

Revised: December 27, 2021

Accepted: December 30, 2021

Correspondence: Sergey V. Alexeev, salex@crust.irk.ru

FOR CITATION: Alexeev S.V., Gladkov A.S., Pellinen V.A., Alexeeva L.P., Svetlakov A.A., 2022. GPR surveys and RPA aerial photography using in conducting geocryological studies on the Oka plateau in the Eastern Sayan ridge. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0621. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0621

ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ И ДПЛА АЭРОФОТОСЪЕМКА ПРИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ОКИНСКОМ ПЛОСКОГОРЬЕ В ВОСТОЧНЫХ САЯНАХ

С.В. Алексеев, А.С. Gladkov, В.А. Пеллинен, Л.П. Алексеева, А.А. Светлаков

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены результаты георадиолокационных исследований многолетнемерзлых пород и аэрофотосъемки, выполненных на ключевых участках в долине р. Сенца (Окинское плоскогорье, Восточные Саяны).

При геофизических исследованиях использовался георадар ОКО-2 в комплекте с экранированным антенным блоком АБ-90, максимальной глубиной зондирования до 20 м и разрешающей способностью 0.5 м. Для учета высотных отметок местности тахеометром Trimble TS635 и дальномером Leica DISTO D 510 выполнены гипсометрические измерения с шагом 1.0 м. Аэрофотосъемка проведена дистанционным пилотируемым летательным аппаратом DJI Inspire 1 pro, оснащенный фотокамерой Zenmuse 3X (разрешение 3840×2160 пикселей) с пространственным разрешением 5.7–7.8 см/пиксель (в разные годы).

В строении мерзлых озерно-аллювиальных отложений выделены три георадарных комплекса, соответствующих слою сезонного оттаивания и мерзлым породам с различным количеством шпиров, линз и прослоев текстурообразующих льдов. Анализ ортофотоплана местности и результатов тахеометрической съемки показал, что разрушение бугров пучения происходит со второй половины апреля до первой половины октября. Наибольшее изменение морфологии рельефа обусловлено оттаиванием льдистых пылеватых суглинков, что приводит к формированию блоков отседания в уступе террасы р. Сенца. Боковая термоэрозия р. Сенца также способствует разрушению бугров пучения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: горная криолитозона; многолетнемерзлые породы; бугры пучения; сезонно-талый слой; текстурообразующие льды; георадиолокация; радарограмма; ДПЛА; аэрофотосъемка; тахеометр

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-45-380002 «Криолитозона Восточных Саян: основные параметры и голоценовая эволюция», использовалось оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (грант № 075-15-2021-682).

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не решены еще многие спорные вопросы, касающиеся эволюции мерзлых толщ и криогенных образований в пределах крупных геоструктур Восточной Сибири. Одной из таких структур является Алтае-Саянская горно-складчатая область. Геокриологическая изученность Окинского плоскогорья в Восточных Саянах крайне низка. В литературе приводятся лишь отрывочные сведения о распространении, мощности (140–250 м) и среднегодовой температуре (–3...–8.5 °С) многолетнемерзлых пород [Solo-vyova, 1976; Ershov, 1989].

Между тем темпы освоения этого высокогорного района требуют решения различных геокриологических и связанных с ними технических задач при прокладке крупных транспортных магистралей, возведении различных инженерных сооружений, добыче полезных ископаемых и т.д. В связи с этим крайне необходимо установить количественные параметры горной криолитозоны, оценить динамику мерзлых толщ (возможную аградацию или деградацию), а также выполнить прогноз изменения состояния мерзлых толщ при сооружении и эксплуатации объектов различного назначения.

Результаты изучения строения мерзлых толщ и динамики современных форм рельефа (в том числе

криогенных) с использованием георадиолокации и дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) не только значительно расширяют существующие представления о формировании и голоценовой эволюции горной криолитозоны Восточных Саян, но и могут служить основой для разработки ответных стратегий и оценки возникновения возможных геокриологических опасностей.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу статьи положены материалы полевых исследований мерзлых пород, бугров пучения и режимных аэровизуальных наблюдений на опорных площадках в долине р. Сенца, выполненных в 2017–2021 гг. с использованием оборудования и приборов ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

Криогенное строение рыхлых отложений изучено с применением российского георадара ОКО-2 в комплекте с экранированным антенным блоком АБ-90, максимальная глубина зондирования до 20 м и разрешающая способность 0.5 м. Действие георадарного оборудования основано на излучении электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [Davis, Annan, 1989; Daniels, 1996; Vladov, Starovoytov, 2004; Vladov, Sudakova, 2017].

Аэрофотосъемка выполнена с помощью ДПЛА (DJI Inspire 1 pro), оснащенного фотокамерой Zenmuse 3X (разрешение 3840×2160 пикселей) с пространственным разрешением 5.7–7.8 см/пиксель (в разные годы). Высота съемки составила 100 м над земной поверхностью, а перекрытие фотографий – 80 %. Цифровая модель местности построена с помощью ПО Arisoft PhotoScan с использованием алгоритмов Structure from Motion и Multi-view Stereo [Ullman, 1979; Scharstein, Szeliski, 2002; Harley et al., 2010; Verhoeven, 2011; Lindgren et al., 2016].

Точность цифровой модели рельефа проверена электронным тахеометром Trimble TS635 и дальномером Leica DISTO D 510.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Георадиолокационные работы выполнены в январе 2021 г. на опорной площадке надпойменной террасы р. Сенца (N 52°39'50.11" E 99°30'03.54", Н 1380 м абс.). Целью исследований было выявление особенностей строения многолетнемерзлых рыхлых отложений,

а также одного из бугров пучения, находящегося в пределах террасы. Профиль был задан от одной скважины, пробуренной в апикальной части бугра пучения (Se-15-скв. 2), к другой, заложенной в понижении (Se-20-скв. 5). По данным бурения литологический разрез сложен переслаивающимися льдистыми озерно-аллювиальными супесями, суглинками и глинами. Криотекстуры мерзлых пород слоистые, косослоистые, тонкошлировые, крупносетчатые, базальные [Alexeev et al., 2017, 2021].

При интерпретации полученных данных определялось значение диэлектрической проницаемости среды (эпсилон) на опорной площадке путем сопоставления результатов документации керна скважин с радарограммой и последующего ручного подбора значения диэлектрической проницаемости, составившего 3.5.

Полученные результаты позволили в строении разреза выделить три георадарных комплекса, различающихся по изменениям волновой картины (рис. 1). Первый из них соответствует слою сезонного оттаивания. Его мощность колеблется от 1.0 до 1.5 м. Второй

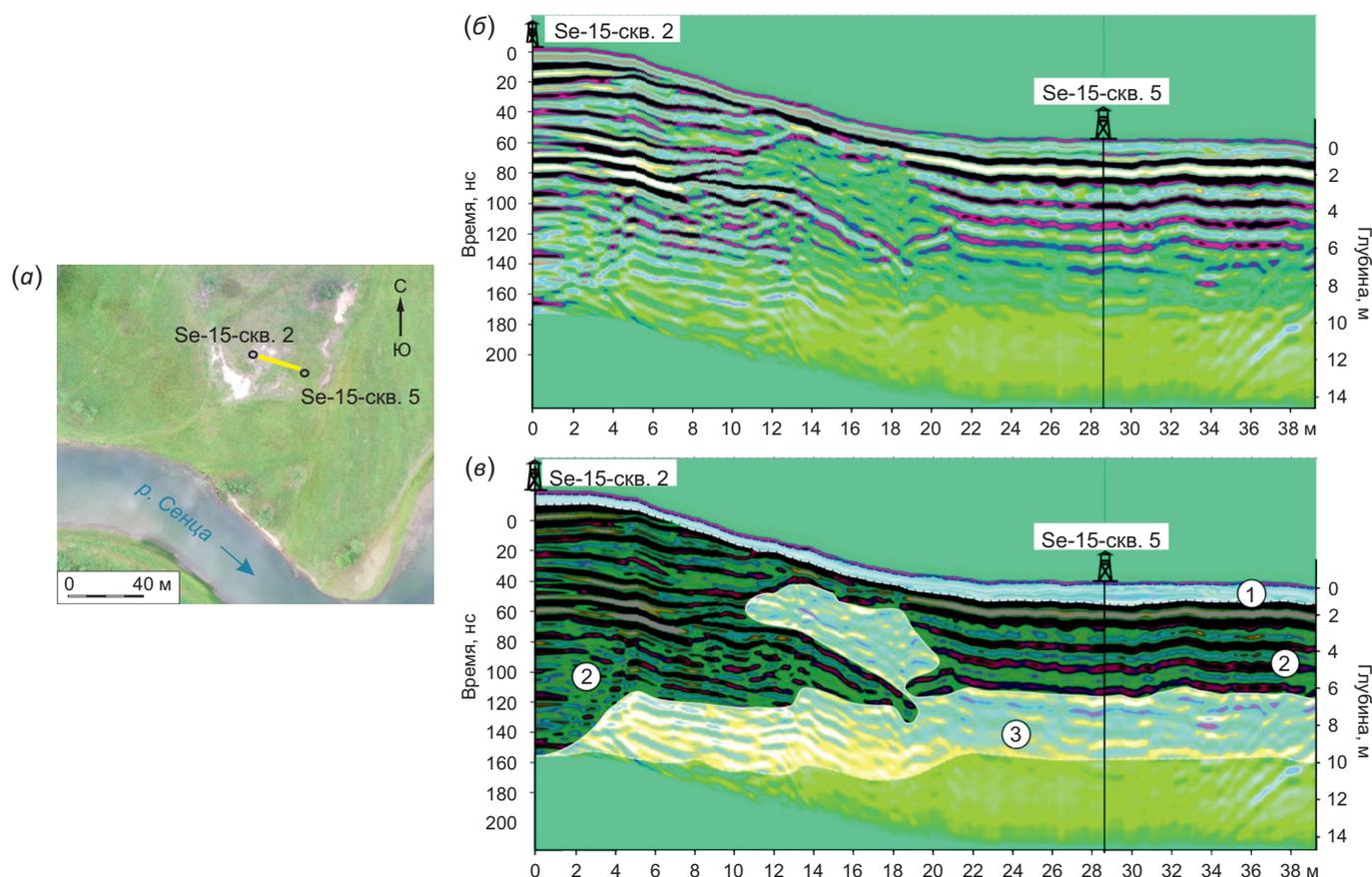


Рис. 1. ДПЛА-фото участка левобережья р. Сенца со скважинами и профилем (а), радарограмма профиля (б) и выделенные георадарные комплексы (в).

Обработка проведена при помощи полосового фильтра с граничными частотами: 0.068–0.238 ГГц. Георадарные комплексы: 1 – слой сезонного оттаивания, 2 и 3 – мерзлые породы с различным количеством ледяных шлиров.

Fig. 1. RPA photo of the Sentsa River left bank with boreholes and profile (а), radarogram of the profile (б) and distinguished GPR complexes (в).

Processing was carried out using a bandpass filter with frequencies: 0.068–0.238 GHz. GPR complexes: 1 – active layer, 2 and 3 – frozen rocks with different amounts of ice schlieren.

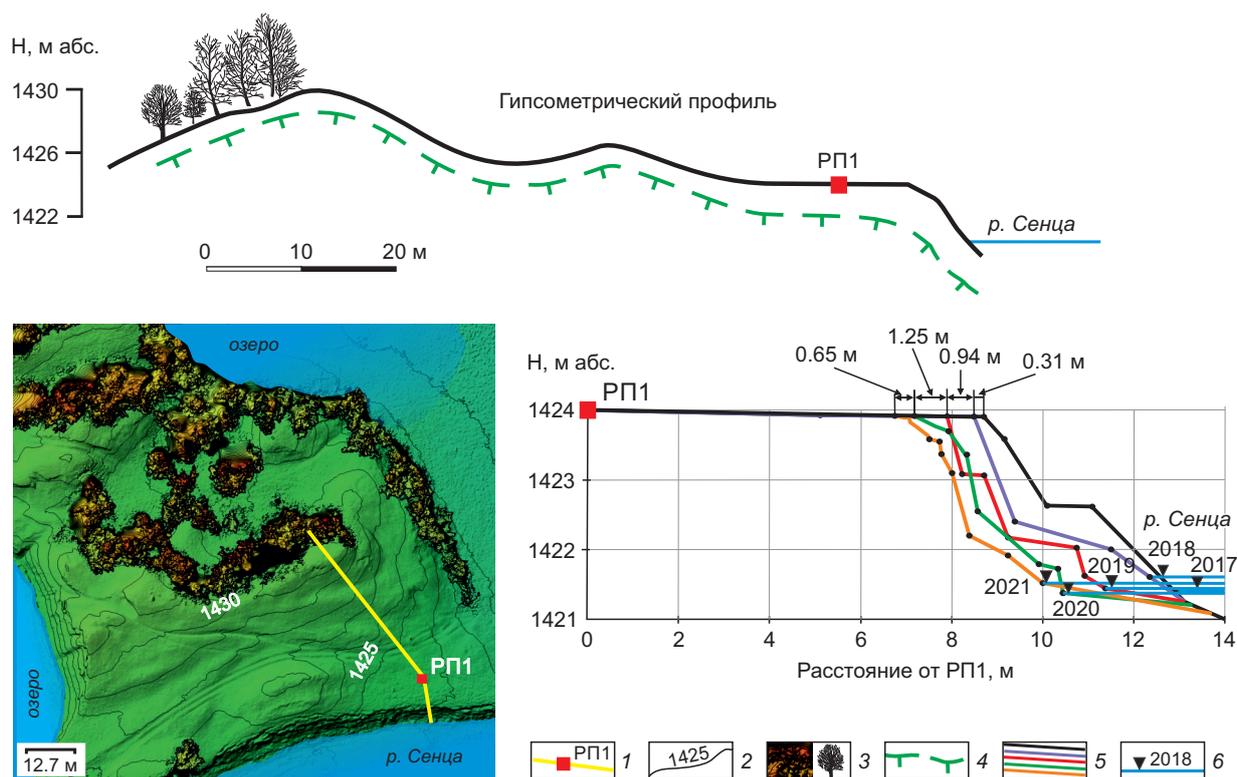


Рис. 2. Отступление бровки террасы р. Сенца в 2017–2021 гг. (N 52°39'49", E 99°29'56").
 1 – линия профиля и репер 1; 2 – изогипсы; 3 – лиственничный лес на фотоплане и на профиле; 4 – подошва сезонно-талого слоя; 5 – профиль берега реки: 2017 г. – черная линия, 2018 г. – фиолетовая, 2019 г. – красная, 2020 г. – зеленая, 2021 г. – коричневая; 6 – уровень воды в реке в разные годы.

Fig. 2. Retreat of the edge of the Sentsa River terrace in 2017–2021 (N 52°39'49" E 99°29'56").
 1 – profile line and benchmark 1; 2 – isohypsum; 3 – larch forest on the photographic plan and on the profile; 4 – the bottom of the active layer; 5 – river bank profile: 2017 – black line, 2018 – purple, 2019 – red, 2020 – green, 2021 – brown; 6 – the water level in the river in different years.

и третий комплексы до глубины 14–15 м отвечают мерзлым породам со шлирами и прослоями льда. Различия в волновых картинах данных комплексов определяются степенью наполнения рыхлых отложений текстурообразующими льдами.

Сопоставление радарограмм с реальными геологическими разрезами скважин показало, что основанием для выделения радарных комплексов является не толщина ледяных шлиров, а их количество на единицу вертикальной мощности разреза, а также расстояние между шлирами.

Установлено, что в центральной части бугра пучения (Se-15-скв. 2) практически весь разрез пронизан шлирами и прослоями льда с минимальными расстояниями между ними (10–15 см), что соответствует комплексу 2 на радарограмме. Среди отложений комплекса 2 на радарограмме отчетливо прослеживаются «раздувы» комплекса 3, которые, вероятно, обусловлены деформацией отложений в период формирования бугра пучения.

Анализ ортофотоплана местности и результатов тахеометрической съемки показал, что разрушение бугров пучения происходит со второй половины апреля до первой половины октября. Наибольшее изменение

морфологии рельефа обусловлено оттаиванием сильнольдистых ($W_{\text{вес}} = 78\%$) пылеватых суглинков, последующим переходом их в текучее состояние, что приводит к формированию блоков отседания в уступе террасы р. Сенца (рис. 2).

Дополнительным фактором, способствующим разрушению некоторых бугров пучения, расположенных вблизи русла реки, является речная боковая термоэрозия. В летнее время береговая линия активно отступает из-за паводков, вызванных проливными дождями. Резкий подъем уровня воды достигает 0.5 м/сут при продолжительности дождей 10–12 ч. За пять лет инструментальных наблюдений установлено, что бровка террасы р. Сенца в результате термоэрозии отступила более чем на 3.0 м.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование георадиолокации при изучении строения мерзлых рыхлых отложений позволяет уверенно картировать наиболее льдонасыщенные интервалы и выделять положение возможных криогенных деформаций разреза.

ДПЛА в сочетании с наземными морфометрическими методами могут успешно применяться при изучении

динамики ландшафтов и ведущих рельефоформирующих процессов, в том числе и криогенных.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны главному инженеру ИЗК СО РАН А.В. Дубынину за помощь при проведении полевых работ.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Svetlakov A.A., Kozyreva E.A., Vasil'chuk Y.K., 2017. Lithology and Composition of Frost Mounds in the Sentsa River Valley (The Oka Plateau, the Eastern Sayan Mountains). *Arctic and Antarctica* 2, 136–149 (in Russian) [Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Светлаков А.А., Козырева Е.А., Васильчук Ю.К. Литология и строение бугров пучения в долине р. Сенца (Окинское плоскогорье, Восточные Саяны) // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 136–149]. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.2.23037>.

Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vasil'chuk Y.K., Svetlakov A.A., Kulagina N.V., 2021. Permafrost of the Oka Plateau (Eastern Sayan Ridge). *Permafrost and Periglacial Processes* 32 (3), 368–391. <https://doi.org/10.1002/ppp.2103>.

Daniels D.J., 1996. Surface-Penetrating Radar. *Electronics & Communication Engineering Journal* 8 (4), 165–182. <https://doi.org/10.1049/ecej:19960402>.

Davis J.L., Annan A.P., 1989. *Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Stratigraphy*.

Geophysical Prospecting 37 (5), 531–551. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>.

Ershov E.D. (Ed.), 1989. *Geocryology of the USSR. Mountain Landforms of the Southern USSR*. Nedra, Moscow, 360 p. (in Russian) [Геокриология СССР. Горные страны юга СССР / Ред. Э.Д. Ершов. М.: Недра, 1989. 360 с.].

Harley M.D., Turner I.L., Short A.D., Ranasinghe R., 2010. Assessment and Integration of Conventional, RTK-GPS and Image-Derived Beach Survey Methods for Daily to Decadal Coastal Monitoring. *Coastal Engineering* 58 (2), 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.09.006>.

Lindgren P.R., Grosse G., Walter Anthony K.M., Meyer F.J., 2016. Detection and Spatiotemporal Analysis of Methane Ebullition on Thermokarst Lake Ice Using Highresolution Optical Aerial Imagery. *Biogeosciences* 13 (1), 27–44. <https://doi.org/10.5194/bg-13-27-2016>.

Scharstein D., Szeliski R.A., 2002. Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. *International Journal of Computer Vision* 47, 7–42. <https://doi.org/10.1023/A:1014573219977>.

Solovyova L.N., 1976. *Morphology of Cryolithozone of the Sayan-Baikal Region (With an Example of Buoryat ASSR)*. Nauka, Novosibirsk, 128 p. (in Russian) [Соловьева Л.Н. Морфология криолитозоны Саяно-Байкальской области (на примере Бурятской АССР). Новосибирск: Наука, 1976. 128 с.].

Ullman S., 1979. The Interpretation of Structure from Motion. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 203, 405–426. <https://doi.org/10.1098/rspb.1979.0006>.

Verhoeven G., 2011. Taking Computer Vision Aloft – Archaeological Three-Dimensional Reconstructions from Aerial Photographs with Photoscan. *Archaeological Prospection* 18 (1), 67–73. <https://doi.org/10.1002/arp.399>.

Vladov V.L., Starovoytov A.V., 2004. *Introduction to Ground-Penetrating Radar*. MSU Publishing House, Moscow, 153 p. (in Russian) [Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.].

Vladov V.L., Sudakova M.S., 2017. *GPR. From Physical Fundamentals to Promising Areas*. Textbook. GEOS, Moscow, 240 p. (in Russian) [Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: Учебное пособие. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.].