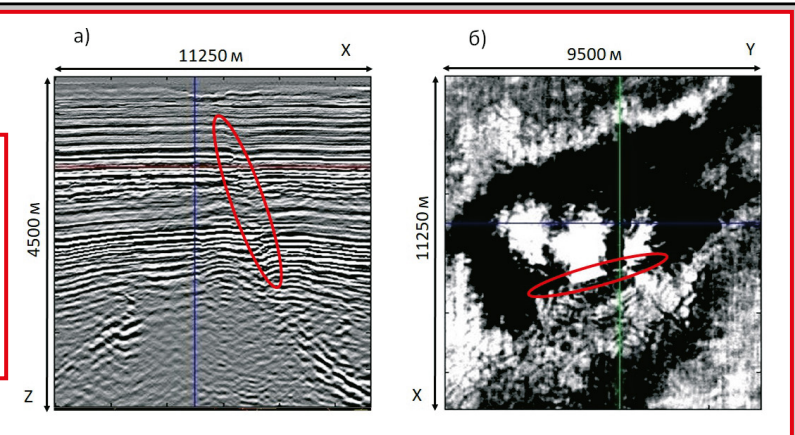
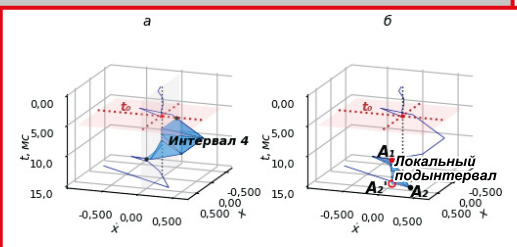




# 4.2024 Геофизика

Результат глубинной миграции по данным 3D сейсморазведки в Карском море:  
а) вертикальный разрез, содержащий крупный разлом;  
б) горизонтальный срез, на котором также идентифицируется крупный разлом (обозначено красным овалом).



1

2

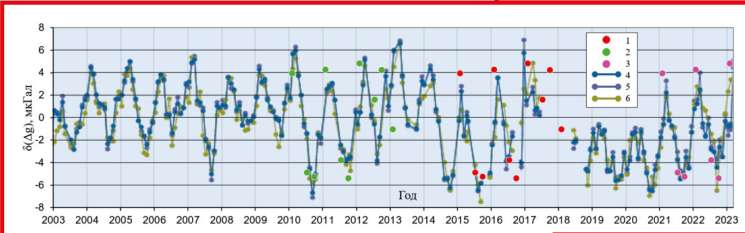
3

4

5

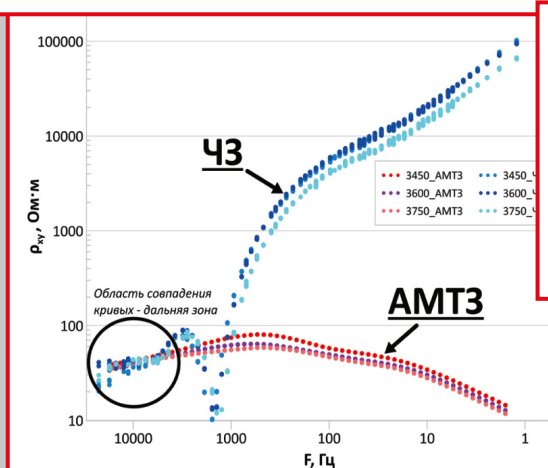
6

▲ Параметрическая кривая синтетической сейсмической трассы.

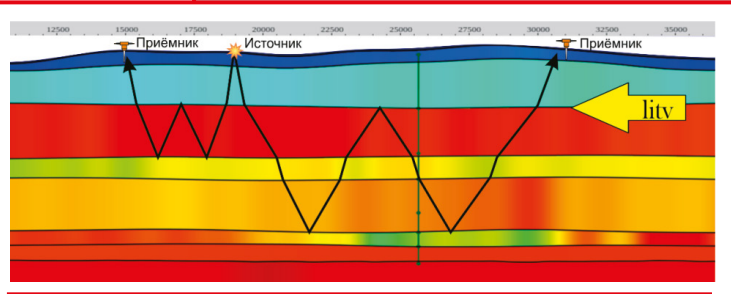


◀ Изменения силы тяжести по данным GRACE и наземного мониторинга.

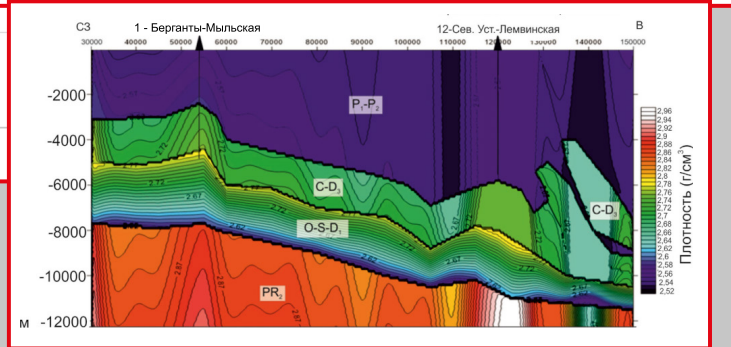
▼ Принципиальная схема образования внутренних кратных волн.



▲ Кривые кажущегося сопротивления по импедансу ЧЗ и AMT3



▶ Геоплотностная модель по линии 1-1' регионального профиля 13-РС (по материалам ФГБОУ ВО «УГТУ»)



## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВЫСОКОТОЧНОЙ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ БОЛГАРСКОГО ГОРОДИЩА С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Б.М. Насыртдинов, Д.И. Хасанов, А.В. Старовойтов

Институт геологии и нефтегазовых технологий ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет".  
420111, Республика Татарстан г. Казань, ул. Кремлевская 4/5. Email: Bulat.Nasyrtdinov@kpfu.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены результаты обработки и интерпретации магнитометрических данных на территории Болгарского государственного историко-архитектурного музея-заповедника. На территории исследования была проведена высокоточная магнитометрическая съёмка в период с 2011 по 2015 гг., площадь съёмки составила 1 120 634 м<sup>2</sup>. Выполнена обработка данных высокоточной магнитометрической съёмки с применением алгоритмов на основе вейвлет-преобразования. В результате были получены карты полного вектора индукции магнитного поля на разных глубинах. Анализ карт срезов позволил выделить 27 линейных объектов различной протяжённости. Глубины выявленных объектов варьируются в пределах от 0.6 м до 2 м.

**Ключевые слова:** магниторазведка, археогеофизика, вейвлет-преобразование, Болгарское городище, археология

## THE RESULTS OF DATA PROCESSING OF HIGH-PRECISION MAGNETOMETRIC SURVEY OF THE BULGARIAN SETTLEMENT USING THE WAVELET TRANSFORM

Bulat M. Nasyrtdinov, Damir I. Khassanov, Alexander V. Starovoytov

Institute of Geology and Petroleum Technologies of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Kazan (Volga Region) Federal University". 420111, Republic of Tatarstan, Kazan, Kremlyovskaya st. 4/5. Email: Bulat.Nasyrtdinov@kpfu.ru

**Abstract.** The article discusses the results of the processing and interpretation of magnetic data obtained from the territory of the Bolgar State Historical and Archaeological Museum-Reserve. In the period from 2011 to 2015, a high-precision magnetic survey was conducted on the study area, which covered 1,120,634 m<sup>2</sup>. Data processing of high-precision magnetic survey using algorithms based on wavelet transformation has been completed. As a result, magnetic field maps have been obtained at various depths. Analysis of the slice maps has allowed identification of 27 linear features of varying lengths. The depth of the identified features ranges from 0.6 m to 2 m.

**Keywords:** Magnetic exploration, archaeogeophysics, wavelet transform, Bulgarian settlement, archaeology.

**Введение.** Магниторазведка как геофизический метод давно зарекомендовала себя для изучения археологических памятников [6, 11, 12] благодаря тому, что магнитные свойства почв, вмещающих пород и археологических объектов различаются. Отличия в магнитных свойствах обусловлены температурным воздействием на объекты, представляющих интерес у археологов (остатки керамики, обожжённые кирпичи, ремесленные печи различного назначения) [5, 9].

Болгарское городище располагается в Спасском районе Республики Татарстан, восточнее современного города Болгар. Оно является значимым культурным и исторически важным центром мирового уровня и, в частности, Республики Татарстан. В 2014 году оно было включено в перечень всемирного наследия ЮНЕСКО.

**Методика проведения и обработки магниторазведочных работ.** Магнитометрическая съёмка территории Болгарского городища проводилась в период с 2011 по 2015 гг. Территория городища площадью 1 120 634 м<sup>2</sup> была разбита на квадраты 50x50 метров с одним общим профилем с каждой стороны. Внутри квадрата выполнялась площадная съёмка масштабом 1:200 с шагом 1 м. Общий объём измерений составил 537 340, из которых контрольных - 5%. Для достижения высокой точности магнитных съёмок был проведен учет солнечно-суточных вариаций магнитометром ММОПС-1 с интервалом измерений 3 с.

В результате обработки были получены карты наблюдаемого (Т) полного вектора магнитной индукции и аномального ( $\Delta T_a$ ) магнитного поля на территории Болгарского городища, величина среднеквадратичной погрешности составила  $\pm 2.42$  нТл [1, 7]. Обработка материалов проводилась в программном пакете Oasis montaj (Geosoft, Канада), для графического представления результирующих карт использовался программный пакет ArcGIS Pro (ESRI, США). Увязка

результатов магнитных съёмок по отдельным квадратам для каждого квадрата производилось с востока на запад по соседним профилям, а также с севера на юг, где квадраты также пересекались в нескольких точках. Измерения проводились с помощью магнитометров Geometrics G-859 и ММОПС-1. На рис. 1 представлена результирующая карта  $\Delta T_a$  Болгарского городища. По данной карте была выделенно и классифицировано 110 объектов, которые представляют собой остатки печей для обжига металлов и керамики, а также скопления битой керамики [1, 7].

Целью количественной обработки являлось определение глубин археологических объектов. Для количественной обработки использовалась программа,

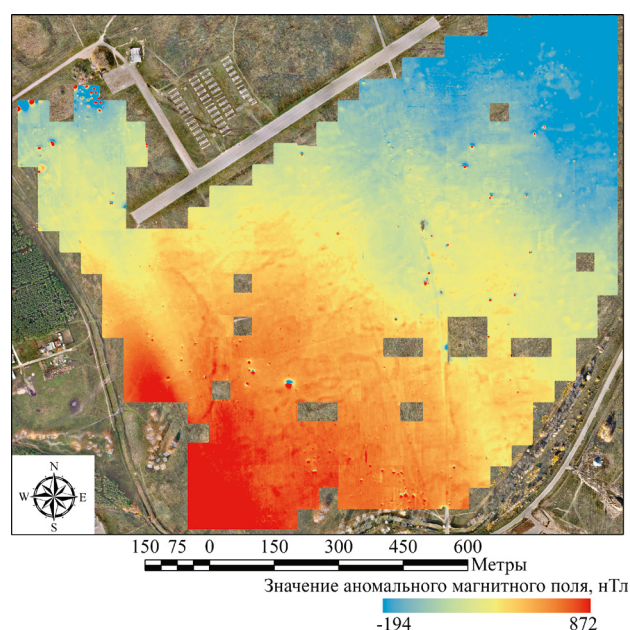


Рис. 1. Карта аномального магнитного поля Болгарского городища, совмещенная с ортофотоснимком 2011 г.

разработанная на кафедре геофизики и геоинформационных технологий Казанского федерального университета. В основе решения обратной задачи лежит частотное разложение поля с помощью вейвлет-преобразования, которое является эффективным инструментом для анализа временных и пространственных данных, позволяя исследовать сигналы на разных масштабах. Применение такого частотного разложения активно используется на кафедре геофизики и геоинформационных технологий для решения обратной задачи в геофизике потенциальных полей [10].

Для решения поставленных задач использовался язык программирования python и модуль pyWavelets. В качестве базисного вейвлета был использован вейвлет «Мексиканская шляпа» (рисунок 2):

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3} \sqrt[4]{\pi}} \exp^{-\frac{t^2}{2}} (1 - t^2) \quad (1)$$

где  $t$  – условное расстояние в плане, зависящее от пространственного разрешения исходных данных.

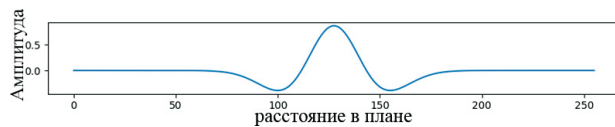


Рис. 2. Форма вейвлета «Мексиканская шляпа».

Модуль позволяет проводить вейвлет-преобразование аномального магнитного поля согласно осям для одномерных и двумерных объектов, но в последнем случае учитываются исключительно две оси для вычисления частотных характеристик. Алгоритм позволяет проводить вейвлет-преобразование с заданным шагом по азимуту (0-180), что позволяет выявить максимальную точную геометрию аномального объекта на различных глубинах. Сами алгоритмы расчета не менялись, а только проводилась плановая трансформация исходных данных для получения результатов под различным азимутом. Таким образом, конечный трёхмерный куб вейвлет-преобразования является результатом осреднения нескольких частотных преобразований.

В качестве исходных карт для обработки использовались:

1. Карта аномального магнитного поля Болгарского городища;
2. Карта аномального магнитного поля Болгарского городища после преобразования Гильберта.

Преобразование Гильберта проводилось с целью получения монополярной аномалии, так как печи для обработки керамики и горны для выплавки металлов представляют собой дипольное распределение [8].

Следует отметить, что территория Болгарского городища подвергалась значительному антропогенному воздействию в ходе жизнедеятельности человека. В результате сильной сельскохозяйственной деятельности верхняя часть культурного слоя вплоть до 0.4 м практически разрушена и представляет из себя смешанный слой, интерпретация которого не представляется возможным [2, 3, 4]. Дальнейшая интерпретация и анализ вейвлет-срезов проводилась только на глубинах от 0.4 м до 4.3 м, так как весь культурный слой Болгарского городища лежит в пределах первых 4 м. В результате были получены вейвлет-срезы на глубинах

от 0.4 м до 4.3 м с шагом по глубине 0.1 м. В ходе анализа результирующих вейвлет-срезов аномальной составляющей вектора индукции магнитного поля без преобразования Гильберта и после преобразования Гильберта, можно отметить, что вейвлет-срезы после преобразования Гильберта выглядят более сглаженно. Таким образом, преобразование Гильберта привело к ухудшению и размытию аномальных участков, и в дальнейшем вейвлет-срезы после преобразования Гильберта не участвовали в дальнейшей обработке и интерпретации результатов.

В результате интерпретации вейвлет-срезов аномальной составляющей вектора индукции магнитного поля были выявлены протяжённые линейные аномалии. Направление этих аномалий не совпадает с направлением съёмки. Они не имеют строгой ориентационной направленности. Но следует отметить, что все протяжённые линейные аномалии соединяют три части Болгарского городища (западную, восточную и южную). Согласно историческим данным, в период бурного развития Болгарского городища, начиная с конца XIII – начала XIV века, в западной, восточной и южной части были образованы новые ремесленные мастерские [2, 3, 4]. Таким образом, можно сделать предположение, что данные протяжённые линейные аномалии являются погребёнными дорогами. Подтверждением данного утверждения может служить проявление современных дорог (разного назначения: асфальтовая, грунтовая), которые аналогичным образом проявляется по форме и морфологии на вейвлет-срезах. На рис. 3 представлен фрагмент центральной части Болгарского городища, совмещённый с ортофотопланом городища 2011 г., показывающий, как проявляются дороги на вейвлет-срезах.

Проявление дорог в магнитном поле можно объяснить увеличением величины магнитной восприимчивости за счёт уплотнения грунта. На участках постоянного пользования происходило загрязнение магнитными объектами, которые могут проявиться в магнитном поле аномальными участками; к таким объектам можно отнести различные металлические

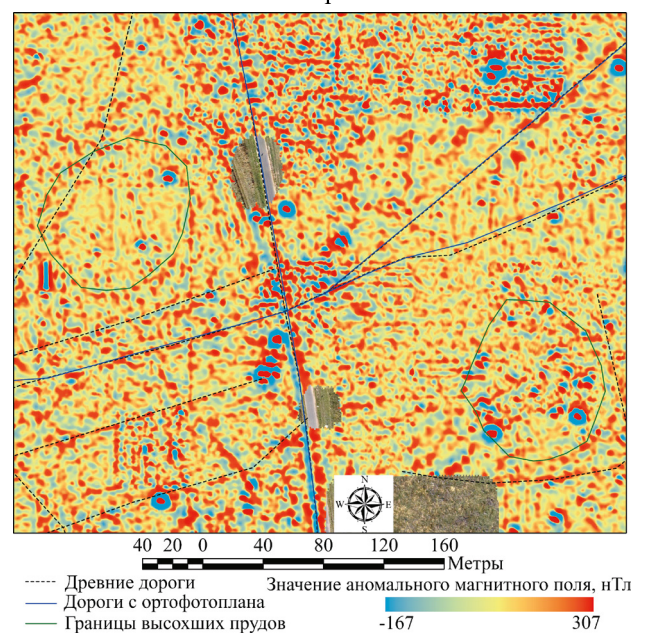
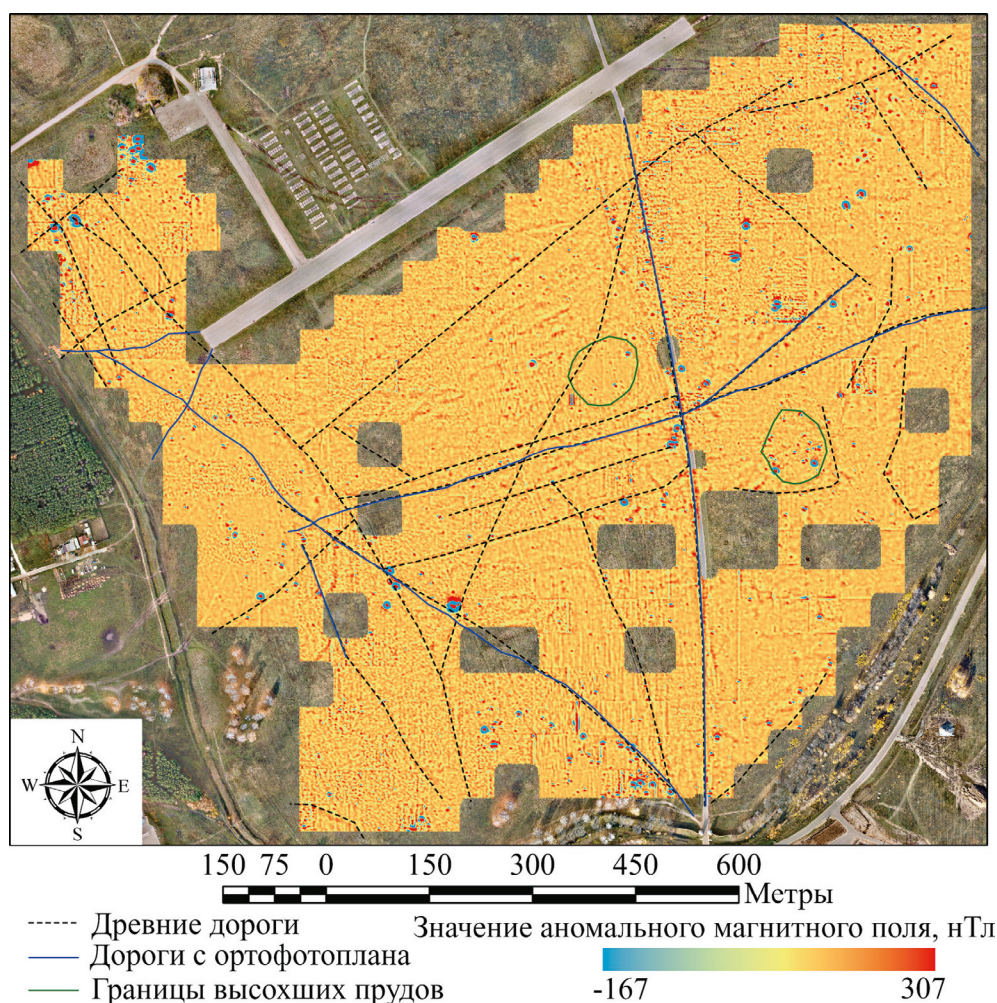


Рис. 3. Фрагмент вейвлет-среза аномальной составляющей вектора магнитной индукции центральной Болгарского городища на глубине 0.5 м

Рис. 4. Вейвлет-срез аномальной составляющей полного вектора магнитной индукции Болгарского городища на глубине 0.5 м.



элементы телег, гвозди, металлические инструменты, керамическую посуду.

На рис. 4 представлен вейвлет-срез аномальной составляющей полного вектора индукции магнитного поля на глубину 0.5 м с выделенными аномалиями. Всего было выявлено 27 линейных объектов и 2 изометричной формы. Отдельные линейные аномалии связаны с современной асфальтовой и грунтовыми дорогами, которые можно выделить по ортофотоплану 2011 г.

Аномалии изометричной формы были интерпретированы как следы высохших прудов, данное утверждение подкрепляется археологическими отчетами [3, 4], в которых описано, что на данной территории располагались пруды для гончарных мастерских. Ещё одним фактором, доказывающим данное предположение, можно считать изменение растительного покрова, наблюдаемое на ортофотоплане. Можно отметить, что рядом с выделенными аномалиями изометричной формы большое скопление магнитных аномалий, схожих по морфологии с остатками горнов и печей (рис. 3). Протяженные аномалии хорошо прослеживаются по вейвлет-срезам на глубинах с 0.5 м до 2 м. Круглые аномалии прослеживаются на глубинах с 0.4 м до 3 м. Причем в этих пределах глубин наблюдается максимум интенсивности полного вектора магнитной индукции по вейвлет-срезу.

**Заключение.** В результате обработки данных высокоточной магнитометрической съемки масштаба 1:200 с применением вейвлет-преобразования были

выявлены 27 протяженных линейных объектов, связанных с дорогами, и две аномальные зоны круглой формы, связанные с прудами. Совместная интерпретация данных вейвлет-анализа априорной археологической информации и космоснимков позволяет сделать выводы о схожести части этих аномалий с современными дорогами и предположить их связь с дорогами древних эпох. Пространственное положение выделенных дорог указывает на тесную связь трех зон: западной, восточной и южной. Датировать возраст выделенных линейных объектов на текущий момент не представляется возможным. Можно предположить, что эти объекты относятся не только к золотоордынскому периоду расцвета древнего г. Болгар.

Две изометричные аномалии на картах вейвлет-срезов аномального поля  $\Delta T_a$  на разных глубинах предположительно интерпретируются как высохшие пруды. Большое скопление небольших локальных знакопеременных аномалий по контуру этих прудов позволяет сделать предположение, что искусственные пруды, по археологическим данным, создавались для работы ремесленных мастерских в период бурного роста промышленности в золотоордынский период конца XIII – начала XIV века. Анализ вейвлет-срезов аномального поля  $\Delta T_a$  позволил определить глубины залегания различных археологических объектов, находящихся на глубинах от 0.6 м до 3 м.

Дата положительной рецензии: 14.08.2024

## Литература

1. Бредников К.И., Хасанов Д.И., Утемов Э.В., Насыртдинов Б.М. Геофизические исследования на территории Болгарского историко-архитектурного музея-заповедника в 2014 году // К.И. Бредников, Д.И. Хасанов, Э.В. Утемов, Б.М. Насыртдинов // Поволжская археология. - 2015. - №3 (13). - С.144-155.
2. Великий Болгар. — М., Казань: Феория, 2013. — 404 с.: ил.
3. Город Болгар: жилища и жилищная застройка. — М.: Наука, 2016. — 247с.
4. Город Болгар: Монументальное строительство, архитектура, благоустройство. — М.: Наука, 2001. — 365с., ил.
5. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. / Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.
6. Кошелев И.Н. Магнитная разведка археологических памятников// Киев, 2005. — Стр. — 313.
7. Насыртдинов Б.М., Хасанов Д.И., Георгиев В.В. Результаты детальных магниторазведочных исследований на территории Болгарского городища в 2012-2015 гг. / Б.М. Насыртдинов, Д.И. Хасанов, В.В. Георгиев // Поволжская археология / *Povolzhskaya Arkheologiya*. — 2017. — №4 (22). — С.36–45.
8. Сmealova T.H., Mельников A.B., Мыц A.B., Беван B.B. Магнитометрическое изучение гончарных печей средневековой Таврики. СПб: Изд-во СПбГУ. - 2000.
9. Снопков С.В. Использование петрофизических методов в археологических исследованиях // Геоархеология и археологическая минералогия, Миасс: Институт минералогии УрО РАН, 2016, с. 50-55.
10. Утёмов, Э.В. Технология обработки и интерпретации гравиметрических данных на основе «естественного» вейвлет-преобразования / Э.В. Утёмов, Д.К. Нургалеев, Г.С. Хамидуллина // Ученые записки Казанского университета - 2010. Т. 152, кн. 2. - С. 208-222.
11. Хмелевской В.К., Костицын В.И. Основы геофизических методов // В.К. Хмелевской, В.И. Костицын; учебник для вузов Перм. ун-т. — Пермь, 2010. — 400.
12. Fassbinder JWE. Seeing beneath the farmland, steppe and desert soil// Magnetic prospecting and soil magnetism. J Archaeol Sci 2015, №56, pp.85-95

## References

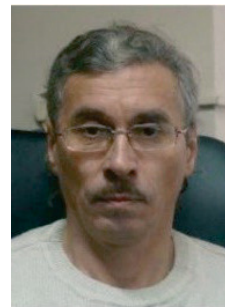
1. Brednikov, K.I., Khasanov, D.I., Utemov, E.V., & Nasyrtdinov, B.M. (2015). Geophysical Research on the Territory of the Bulgarian Historical and Archaeological Museum-Reserve, *Volga Archeology*, 3(13), 144–155.
2. Great Bulgarian (2013). M., Kazan, Feoria.
3. City of Bulgars: Dwellings and Residential Buildings (2016). M., Nauka.
4. City of Bulgars: Monumental Construction, Architecture, Landscaping (2001). M., Nauka.
5. Dortman, N.B., Physical Properties of Rocks and Minerals (Petrophysics) (1984). Handbook of Geophysics, M., Nedra.
6. Koshelev, I.N., Magnetic Exploration of Archaeological Sites (2005).313.
7. Nasyrtdinov B.M., Khasanov D.I., Georgiev V.V. "Results of detailed magnetic survey on the territory of the Bulgarian settlement, 2012–2015." *Volga Archeology*, 2017; 4(22):36–45.
8. Smealova T.N., Melnikov A.V., Myts A.V., Bevan B.V. "Magnetometric study of medieval Taurica pottery kilns." St Petersburg: St Petersburg State University Press. 2000
9. Snopkov S.V. "The use of geophysical methods in archaeology." *Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy*. Miass: Ural Branch, Russian Academy of Sciences. 2016:50–55
10. Utemov E.V., Nurgaliev D.K., Khamidullina G.S. "Technology of processing and interpreting gravimetric data using 'natural' wavelet transform." *Scientific Notes of Kazan University*. 2010; 152(2): pp. 208–222
11. Khmelevskoy V.K. and Kostitsyn V.I., Fundamentals of Geophysical Methods, V.K. Khmelevskoy and V.I. Kostitsyn (2010). Textbook for universities, Perm University.
12. Fassbinder JWE. Seeing beneath the farmland, steppe and desert soil// Magnetic prospecting and soil magnetism. *J Archaeol Sci* 2015, №56, pp.85-95.

## Об авторах:



**НАСЫРТДИНОВ**  
Булат Мансурович

*старший преподаватель в Институте геологии и нефтегазовых технологий ФГАОУ ВО Казанского (Приволжского) федерального университета*



**ХАСАНОВ**  
Дамир Ирекович

*доцент Института геологии и нефтегазовых технологий ФГАОУ ВО Казанского (Приволжского) федерального университета*



**СТАРОВОЙТОВ**  
Александр Владимирович

*ассистент Института геологии и нефтегазовых технологий, ФГАОУ ВО Казанского (Приволжского) федерального университета.*