



УДК 550.389.5

ПОДХОДЫ ПРОГНОЗА ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

И.В. Лыгин¹, А.А. Брагина¹, Д.Д. Вишняков¹¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В статье предложена классификация подходов пространственного и временного прогноза геомагнитных вариаций. Часть подходов основана на использовании алгоритмов машинного обучения. В зависимости от типа прогнозной задачи (временная, пространственная или пространственно-временная) рассматриваются наборы геолого-геофизической и иной информации, которые, по мнению авторов, обеспечивают повышение качества прогноза. Описаны все этапы реализации прогноза, включая сбор и обработку базы данных геомагнитных вариаций. Результаты прогноза продемонстрированы на нескольких примерах. В заключении сделан анализ результатов и отмечены перспективы продолжения исследований по данной тематике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: машинное обучение, геомагнитные вариации, магнитное поле Земли (МПЗ), прогнозирование, магнитовариационные станции (МВС), геолого-геофизическая информация

DOI 10.5425/2304-7380_2023_41_42

<https://elibrary.ru/dxwjzc>

1. ВВЕДЕНИЕ

Вариации магнитного поля Земли неоднородны в пространстве и во времени. Пространственно-временная неоднородность поля магнитных вариаций обусловлена как внешними по отношению к Земле, так и внутренними причинами. Внешние причины – это вариации солнечной активности, изменения в характере распределения ионосферных токов, в меньшей степени факторы, относимые к «космической погоде». Внутренние причины – электромагнитные явления в литосфере и мантии, пространственная вариативность которых может быть обусловлена сменой геологических условий, а временная – проявлением активных геодинамических процессов. Пространственные особенности геологического строения отражены в изменчивости литологического состава, мощностей слоев земной коры (мощности осадочного чехла, глубины до границы Мохоровичича и другие) и фиксируется геофизическими методами (сейсморазведка, гравиразведка, магниторазведка, электроразведка). К вариациям, связанным с геодинамическими процессами, можно отнести сейсмическую активность, в меньшей степени (наименее изученные) изменения гидрогеологических режимов (подземного водотока рек, озер, уровня грунтовых вод и другие), изменения вблизи геодинамически активных границ литосферных плит, в областях современного вулканизма и другие.

Электронная почта авторов для переписки:

Брагина Анастасия Андреевна, e-mail: anastasia.a.bragina@yandex.ru
Лыгин Иван Владимирович, e-mail: lygin@geophys.geol.msu.ru
Вишняков Дмитрий Дмитриевич, e-mail: d.vish@mail.ruАдрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru<https://elibrary.ru/dxwjzc>

При проведении магниторазведочных работ обязательным элементом является регистрация вариаций с помощью магнитовариационной станции (МВС). Методическими указаниями предусмотрена установка МВС согласно определенным требованиям в безаномальном поле, вблизи производства работ [1]. Удовлетворение требований инструкции в ряде случаев фактически невозможно по объективным причинам. В первую очередь это относится к гидромагнитным съемкам на удаленных от суши частях акваторий, аэромагнитным съемкам больших территорий, изучение сильномагнитных объектов. Кроме сложности с размещением МВС, в этих случаях часто возникает проблема учета пространственной неоднородности поля геомагнитных вариаций, которая в полной мере проявляется лишь на этапе обработки данных после завершения полевых работ. Для минимизации эффекта пространственно-временной неоднородности вариаций, снижающего качество магнитометрических съемок на акваториях, применяется метод дифференциальных наблюдений [2], при аэромагнитных исследованиях устанавливается жесткое ограничение на выполнение наблюдений в зависимости от временного градиента вариаций [3]. В то же время при определенных условиях возможно применять экстраполяционные и интерполяционные методы прогноза геомагнитных вариаций между станциями, фиксирующими регистрации. Один из таких методов реализован в программном обеспечении LCT GraviMag Solution. В приложении вариации магнитного поля на площади съемки рассчитываются на основе сопоставления записей вариаций удаленных МВС и записей съемочного магнитометра. Если в скользящем окне обнаруживается корреляция между двумя записями, но они различаются по амплитуде или фазе, то в интерактивном режиме осуществляется коррекция наблюдаемых вариаций до их полного соответствия наблюдаемым значениям. Метод хорошо работает в спокойном вариационном поле, но для условий пространственно-временной неоднородности вариаций такой подход не применим.

2. ПОДХОДЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ПРОГНОЗА ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ И ВИДЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЗАВИСИМОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

Стремительный рост вычислительных возможностей, развитие математических методов, в том числе на основе методов машинного обучения дает возможность сформулировать и решать задачу прогноза геомагнитных вариаций во времени и пространстве по данным наблюдений на одной или нескольких магнитовариационных станциях. Подходы к пространственно-временному прогнозу геомагнитных вариаций обобщены в единой блок-схеме по сложности прогноза и использованию дополнительной информации (табл. 1).

Одномерный прогноз (1Д) – это временной прогноз, при котором выполняется расчет значений для определенных временных интервалов, то есть осуществляется заполнение пробелов в записях геомагнитных наблюдений. Двумерный прогноз (2Д) – это пространственный прогноз, в рамках которого рассчитываются значения вариаций для конкретного времени. При двумерном прогнозе не устанавливаются временные зависимости. Трехмерный прогноз (3Д) – совокупность временного и пространственного прогноза, при котором формируется объемная модель («куб») пространственно-временных данных с заданной дискретностью по плановым координатам и временной оси.

При прогнозе вариаций можно задействовать дополнительную информацию или опираться только на данные непосредственных наблюдений вариаций. Виды дополнительной информации различаются в зависимости от размерности прогноза (табл. 1, колонка 4) и представляют собой данные, прямо или косвенно связанные с характером вариаций в пространстве и времени.

При временном (1Д) прогнозе в качестве дополнительной информации могут использоваться данные, характеризующие изменчивость вариаций во времени. К данным, имеющим прямую связь с характером вариаций, можно отнести индексы геомагнитной активности, косвенные данные – это потоки радиоизлучения Солнца или числа Вольфа.

Пространственный (2Д) прогноз может основываться как на рассчитываемых зависимостях характера вариаций от географических условий (например, высота поверхности наблюдения, близость к береговой линии, удаленность от авроральной зоны) или изменении их статистических характеристик в пространстве, так и связываться с изменением геолого-геофизических условий (например, изменение характера аномалий магнитного или гравитационного поля, измеренного на поверхности Земли).

При пространственно-временном прогнозе (3Д) во внимание могут браться как перечисленные виды данных, так и описывающие пространственно-временные изменения наблюдаемых физических

параметров на поверхности Земли или в околоземном пространстве. Таковыми могут являться геомагнитные вариации и вариации гравитационного поля по данным спутниковых наблюдений, вариации содержания электронов в ионосфере, озона в атмосфере.

Список дополнительной информации не ограничивается перечисленными наборами данных и может дополняться по мере необходимости.

3. БАЗЫ ДАННЫХ И ОБРАБОТКА ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

Для демонстрации возможностей пространственно-временного прогноза вариаций магнитного поля ниже приводится несколько примеров, фактический материал для которых подготовлен по единой схеме, включившей:

1. выбор территории исследования и временного интервала для прогноза вариаций магнитного поля;
2. выбор набора МВС и формирование базы данных [4] вариаций магнитного поля по записям каталога INTERMAGNET [5];
3. обработка данных наблюдений.

Для разработки и тестирования методов прогноза отобраны данные 20 Европейских геомагнитных обсерваторий международной сети INTERMAGNET, показанных на рисунке 1. Временной интервал выбран с 1 января 2009 года по 31 декабря 2018 года. Основными критериями выбора европейского региона и временного интервала являлись: наибольшее количество обсерваторий на единицу площади, соответствие временного периода полному циклу солнечной активности (24-й цикл, начался в 2008 году и продлился до 2019 года), максимальное количество одновременно действовавших обсерваторий в выбранном временном интервале.

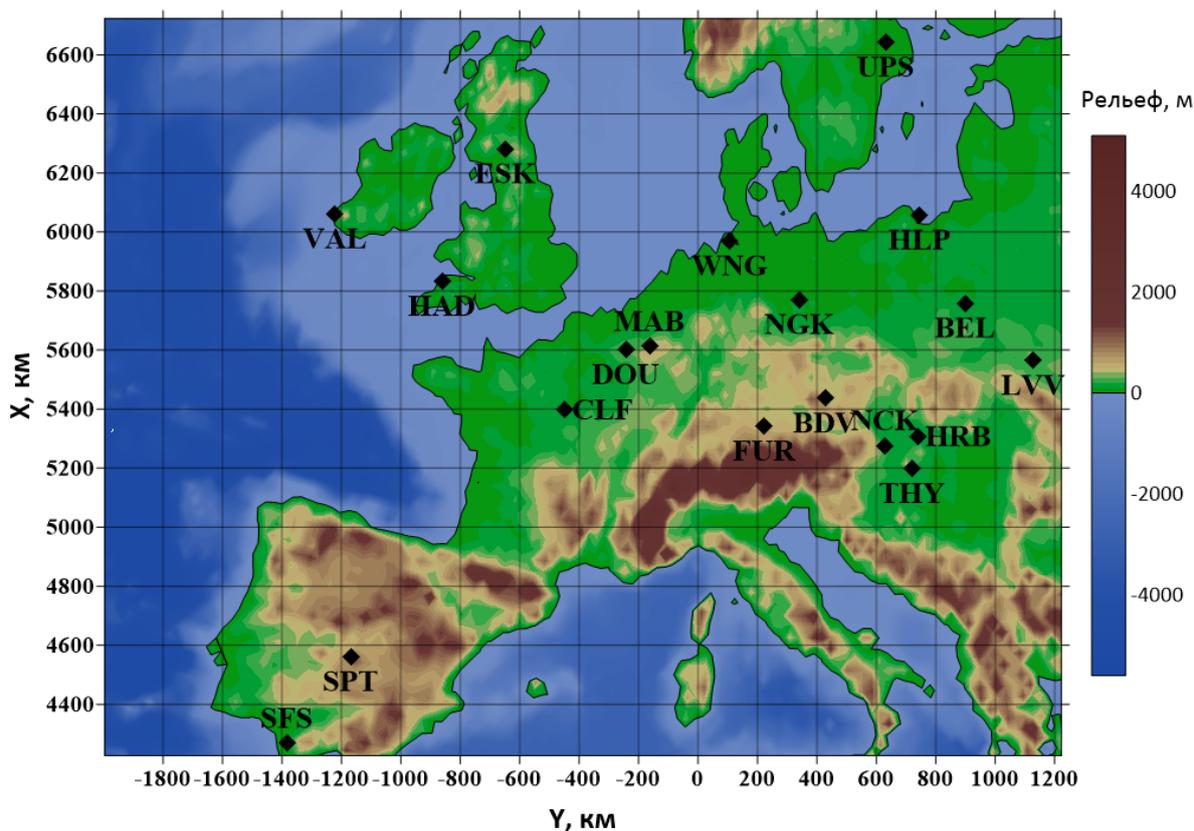


Рис. 1. Расположение обсерваторий сети INTERMAGNET, использованных в работе.
Подложка – рельеф поверхности

Таблица 1. Подходы пространственно-временного прогноза геомагнитных вариаций

Размерность прогноза	Без использования дополнительной информации	С использованием дополнительной информации (зависимая интерполяция)	Виды дополнительной информации
1	2	3	4
1Д (временная) – прогноз в точке с заданными координатами)	<i>Временной</i> прогноз – поиск корреляционной связи между значениями на всех станциях	Линейная регрессия – <i>временной</i> прогноз с использованием меняющихся во времени дополнительных параметров (<i>одного или нескольких</i>)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Индексы геомагнитной активности Кр, Ар и др. 2. Поток радиоизлучения Солнца с длиной волны 10,7 см. 3. Числа Вольфа (количество солнечных пятен, то есть характеристика солнечной активности).
2Д (пространственная)	Учёт вариаций по одной МВС	Линейная регрессия в заданном моменте времени – поиск корреляционной связи <i>на одном</i> времени <i>по одному</i> параметру – кокригинг (применимо, если количество МВС > 1)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Географические (широта, долгота, удаленность от авроральной зоны, высота поверхности наблюдения, близость к береговой линии). 2. Статистические атрибуты геомагнитных вариаций (дисперсия, мат. ожидание, эксцесс, асимметрия и др.). 3. Геолого-геофизическая информация (аномальное гравитационное поле, мощность осадочного чехла, тепловой поток, элементы геологической карты и др.).
	Триангуляция и линейная интерполяция между МВС (в соответствии с Инструкцией..., 1981г.)	Множественная регрессия в заданном моменте времени – поиск корреляционных связей <i>на одном</i> времени <i>по набору</i> параметров (геолого-геофизические признаки) (применимо, если количество МВС > 1)	
	Нелинейная интерполяция (кригинг, метод минимальной кривизны, триангуляция и др.)		
3Д (пространственно-временная)	Интерполяция во временном окне различными методами трехмерного гридирования	Множественная регрессия во временном окне – поиск корреляционных связей <i>во временном окне по набору</i> параметров (на основе свёрточной модели геомагнитных вариаций)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Геомагнитные вариации по данным спутниковых наблюдений (GOES-S, GOES-R и др). 2. Вариации содержания электронов в ионосфере, озона в атмосфере. 3. Вариации гравитационного поля GRACE-FO и др.

Исходно данные магнитовариационных станций представлены с дискретностью 1 час. С целью минимизации времени расчета при тестировании алгоритмов по различным методам дискретность данных увеличена до 30 дней с выделением остаточной компоненты временных вариаций. Результативность обработки продемонстрирована на примере вариаций магнитного поля, зарегистрированных на обсерватории Hurbanovo (HRB, Словакия) (рис. 2А). Алгоритм включает следующие этапы:

1. удаление нормального поля по модели IGRF [6] и аномального магнитного поля по модели EMAG2v3 [7] (рис. 2Б, В);
2. удаление временного тренда остаточных вариаций, аппроксимированного полиномом 5 степени (рис. 2В, Г);
3. низкочастотная фильтрация (фильтр Гаусса) с шириной фильтра 2700 часов (~3,75 месяца). Выбор такого параметра обоснован тем, что для минимизации времени расчетов при реализации рассматриваемых ниже примеров создается компактная база исходных данных.
4. Децимация базы данных с шагом в 30 дней (1 месяц). Выбранная дискретность (30 дней) обеспечивает 3 – 4 точки записи на размер сглаживающего фильтра, примененного на предыдущем этапе (рис. 2Д).

Результатом обработки являются остаточные вариации магнитного поля после низкочастотной фильтрации (рис. 2Д). Их амплитуда менее 15 нТл за рассматриваемый временной период (рис. 2Д). На рисунке 3 представлены данные после обработки для всех выбранных обсерваторий. Следует отметить высокую степень синхронности – повторяемость структуры остаточных вариаций магнитного поля на обработанных записях всех МВС. Далее по тесту остаточные вариации магнитного поля после низкочастотной фильтрации для краткости будут называться вариациями магнитного поля.

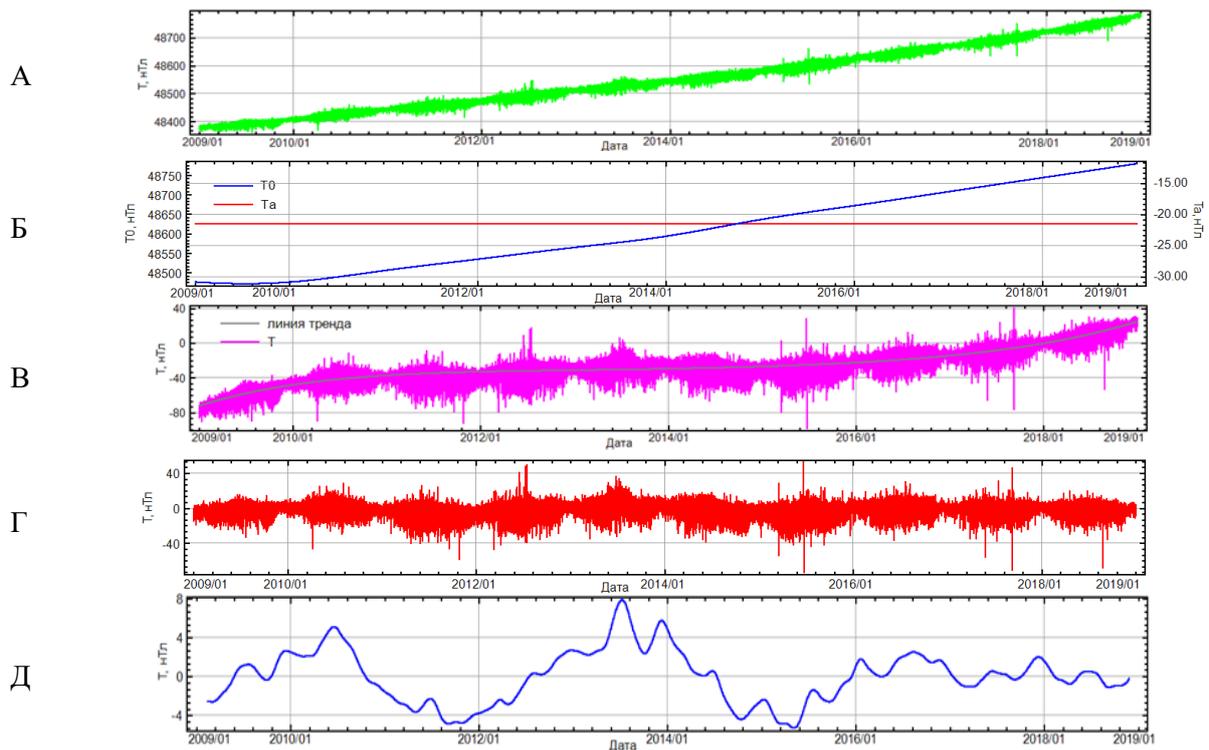


Рис. 2. Вариации магнитного поля по данным обсерватории Hurbanovo (HRB, Словакия) с 01.01.2009 по 31.12.2018:

А – наблюдаемые вариации магнитного поля; Б – изменение значений нормального (T_0) и постоянное значение аномального (T_a) магнитных полей; В – остаточные вариации после удаления изменения нормального (T_0) и аномального (T_a) магнитных полей и их временной тренд; Г – остаточные вариации после удаления временного тренда; Д – остаточные вариации после низкочастотной фильтрации.

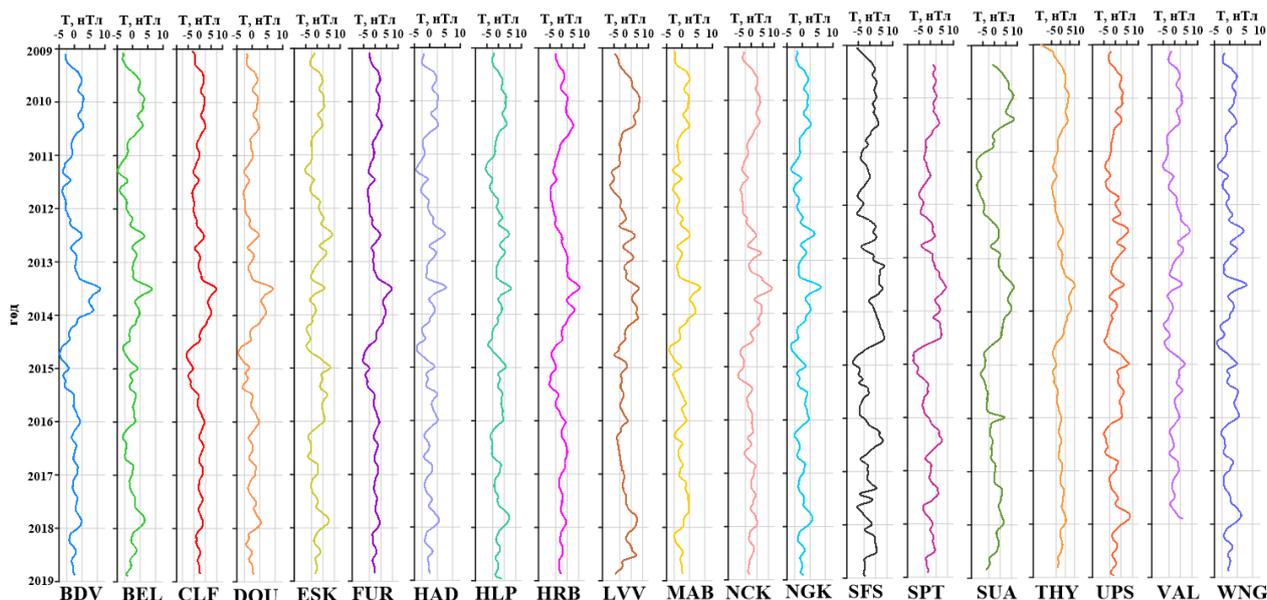


Рис. 3. Остаточные вариации магнитного поля после низкочастотной фильтрации с 2009 по 2018 год для 20 МВС Европейского региона

4. ПРИМЕРЫ ПРОГНОЗА ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В приведенном примере, из перечисленных выше возможных подходов (табл. 1) нами реализованы пространственный и пространственно-временной прогноз без использования дополнительной информации; временной прогноз геомагнитных вариаций методами машинного обучения (заполнение отсутствующих значений на станциях) с опорой на данные других станций; пространственный прогноз геомагнитных вариаций с использованием дополнительных данных методами машинного обучения.

4.1 Пространственный и пространственно-временной прогноз без использования дополнительной информации

Любой прогноз, при котором не задействована дополнительная информация, по факту сводится к хорошо разработанным задачам интерполяции и экстраполяции. Методы одномерной (вдоль профиля), площадной и объемной интерполяции и экстраполяции широко представлены в соответствующих специализированных геоинформационных программных комплексах (например, Golden Software Surfer [8], ESRI ArcGIS, Geosoft Oasis Montaj [9], GravMagInv-2D, GravMagInv-3D и другие). Они применяются для создания сеточных или грид-файлов значений, регулярно распределенных в соответствующих координатных точках.

Примеры площадного и объемного распределений геомагнитных вариаций, полученные интерполяцией в точки равномерной сети методом обратных расстояний приведены на рис. 4. Пространственный и пространственно-временной прогноз, выполненный одним из стандартных методов интерполяции обратных расстояний для описанного выше набора данных, при проверке на отложенной выборке обеспечивает среднее квадратическое отклонение (СКО) на уровне ± 2 нТл (19 %) при среднем отклонении менее 0.05 нТл (0.46 %). Проценты рассчитаны от значения полной амплитуды сигнала (от минимального до максимального).

4.2 Временной прогноз вариаций на основе методов машинного обучения по известным вариациям без использования дополнительной информации

Часто регистрация геомагнитных вариаций выполняется с пропусками в записях, вызванных техническими причинами или магнитными бурями. Для восполнения данных разработан алгоритм, использующий методы машинного обучения, которые обеспечивают выявление корреляционных связей между данными МВС, для которой необходимо заполнить пропуски, и полными, без пропусков,

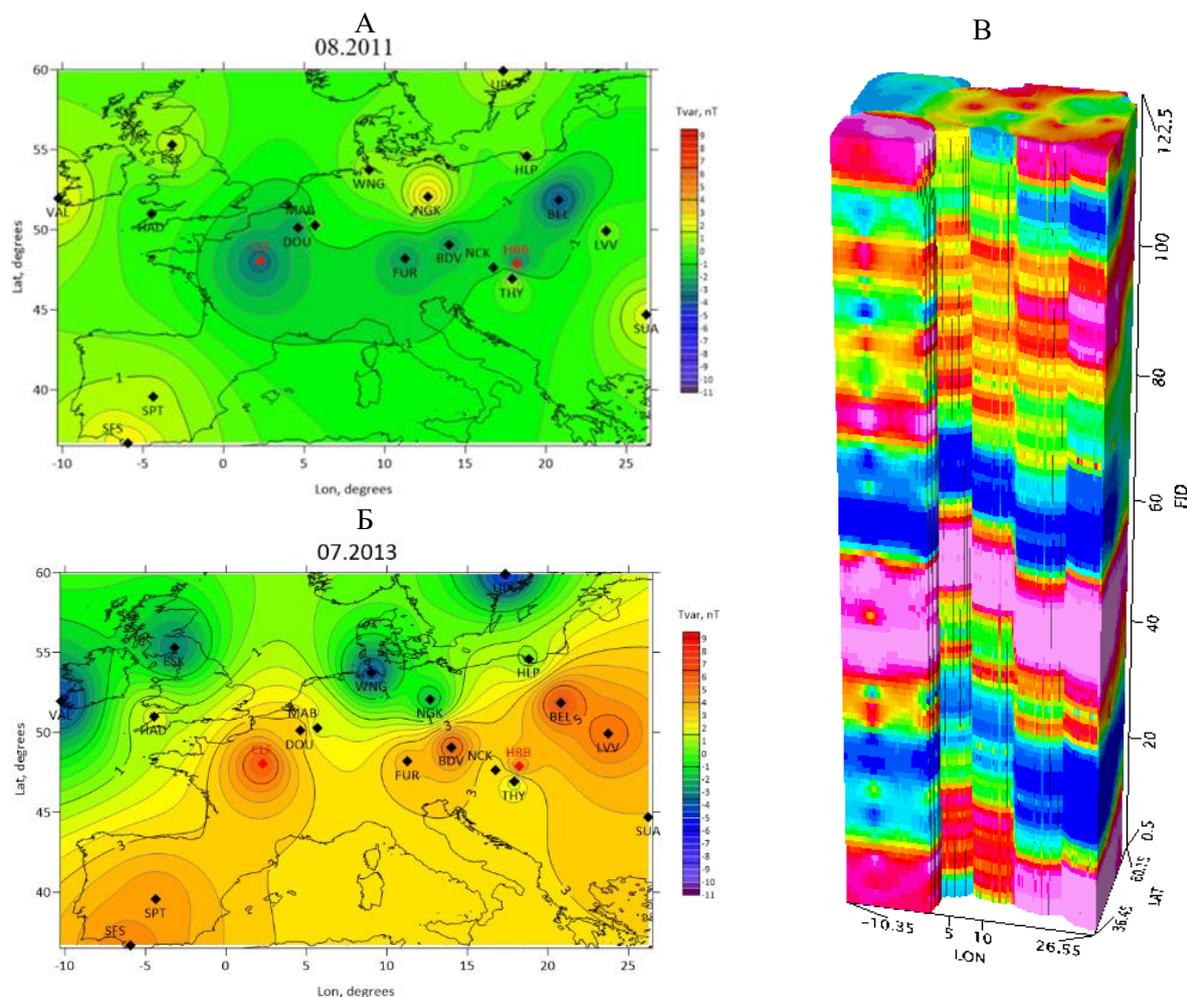


Рис. 4. Примеры площадных (А, Б) и объемных (В) распределений геомагнитных вариаций, полученные интерполяцией в точки равномерной сети методом обратных расстояний

данными прочих обсерваторий. Поскольку алгоритм не учитывает пространственного положения каждой обсерватории, то на этапе обучения формируются такие параметры корреляций, которые «предсказывают в заданный временной интервал» только наиболее вероятные значения вариации. При этом, вероятное значение вариации формируется не как среднее, а как средневзвешенное значение с учетом значений коэффициентов корреляции, рассчитанных по всем станциям. Были опробованы следующие методы регрессии: множественная линейная регрессия, градиентный бустинг, метод опорных векторов, случайный лес. Их программная реализация доступна при программировании на языке Python (среда разработки Jupiter Notebook на базе ПО Anaconda Navigator [10]) в виде готовых библиотек.

Набор данных включает записи станции с пропусками, записи станций без пропусков. Последние разделяются на две выборки обучающую и отложенную. Алгоритм прогноза вариаций состоит из двух основных этапов – обучения и прогноза.

На этапе **обучения** выполняется поиск корреляционных связей на временном интервале, для которого имеются зарегистрированные записи вариаций на всех станциях. Предполагается, что устанавливаемые корреляционные связи будут сохраняться и для временного интервала с пропусками записей. Корректировка параметров устанавливаемых корреляций выполняется с использованием отложенной выборки.

На этапе **прогноза**, по установленным параметрам корреляции для временного интервала, не использовавшегося на этапе обучения, рассчитываются искомые (прогнозные) значения.

В примере, для рассматриваемого набора данных прогноз проведен для станции (NCK), оставшиеся записи 19 станций разделены в пропорции 80% на 20% (то есть 15 и 4) на эталонную и

отложенную выборки, согласно рекомендациям [11]. Обучение происходило в интервале 2009 – 2017 годы, а прогноз в более коротком – 2017 – 2019 годы. Результаты работы каждого метода машинного обучения в сопоставлении с исходными данными приведены в таблице 2 и на рисунке 5. Наименьшее отклонение от истинных значений получено методом линейной регрессии, но среднее квадратическое отклонение в процентном выражении составляет ~23%, что не для всех задач, изучающих вариации магнитного поля, считается достаточной точностью.



Рис. 5. Сравнение истинных значений геомагнитных вариаций и прогнозных, полученных при временном прогнозе

Таблица 2. Статистические характеристики результатов временного прогноза вариаций с использованием методов машинного обучения

Статистические характеристики	Методы машинного обучения, решающие задачу регрессии			
	Множественная линейная регрессия	Градиентный бустинг	Метод опорных векторов	«Случайный Лес»
Среднее квадратическое отклонение, нТл (%)	0.74 (23.3)	1.32 (25.0)	1.78 (28.0)	1.15 (23.5)
Среднее отклонение, нТл (%)	0.09 (3.1)	0.72 (13.8)	1.20 (18.8)	0.97 (19.9)

4.3 Пространственный прогноз вариаций методами машинного обучения с использованием дополнительных данных

Пространственный прогноз вариаций методами машинного обучения с использованием дополнительных данных аналогичен площадной интерполяции. Единственным и существенным отличием является замена интерполяционных методов на методы регрессии (или методы, обеспечивающие зависимую интерполяцию). В качестве алгоритмов регрессии протестированы, упомянутые выше. Для зависимой интерполяции (или для построения корреляционных связей) подбираются независимые признаки из набора дополнительных данных. Нами использованы следующие признаки:

1. географическое положение станции записи геомагнитных вариаций;
2. грид-файл со значениями гравитационного поля в редукции Буге по модели WGM2012 [12];
3. грид-файл со значениями аномального магнитного поля по модели EMAG2v3 [7];
4. грид-файл со значениями мощности осадочного чехла по модели CRUST v1.0 [13];
5. грид-файл со значениями глубин до поверхности Мохоровичича по модели «Moho depth of the European plate» [14];
6. грид-файл со значениями плотности теплового потока по модели «Global Heat Flow Database» [15].

Следует отметить, что описываемый подход аналогичен подходу, применяемому для прогноза морфологии структурных горизонтов по набору геолого-геофизических признаков (гравитационному, магнитному полям и др.) [16].

Реализация подхода так же, как и в предыдущем примере, выполняется в два этапа – обучение и прогноз. На каждый момент времени выбираются записи значений вариаций магнитного поля со всех станций. Алгоритм работы программы также поделен на два этапа.

1. Для каждого момента времени формируется массив данных (временной срез), содержащий информацию о географическом положении вовлеченных станций, временном индексе (номер 30-дневного периода), значении вариации в точке, значениях дополнительных признаков. Затем последовательно для каждого временного среза осуществляется обучение системы с использованием различных методов регрессии (множественная линейная регрессия, градиентный бустинг, метод опорных векторов, случайный лес).

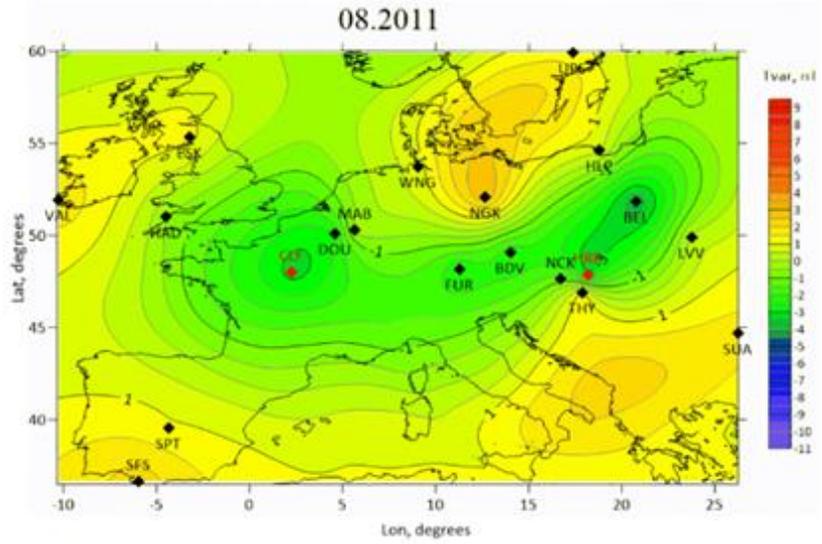
2. Для каждого временного среза с использованием подобранных параметров регрессии строится массив прогнозных значений.

Результаты оценки точности прогноза для станций, не участвовавших в обучении – из отложенной выборки «Chambon-la-Foret (CLF, Франция)», «Hurbanovo (HRB, Словакия)», представлены в таблице 3 и на рис. 6. В совокупности, все методы показали примерно одинаковую точность прогноза по параметру СКО около 18-20%. Как таковых существенных различий в результатах применения разных алгоритмов на данном этапе исследований не выявлено.

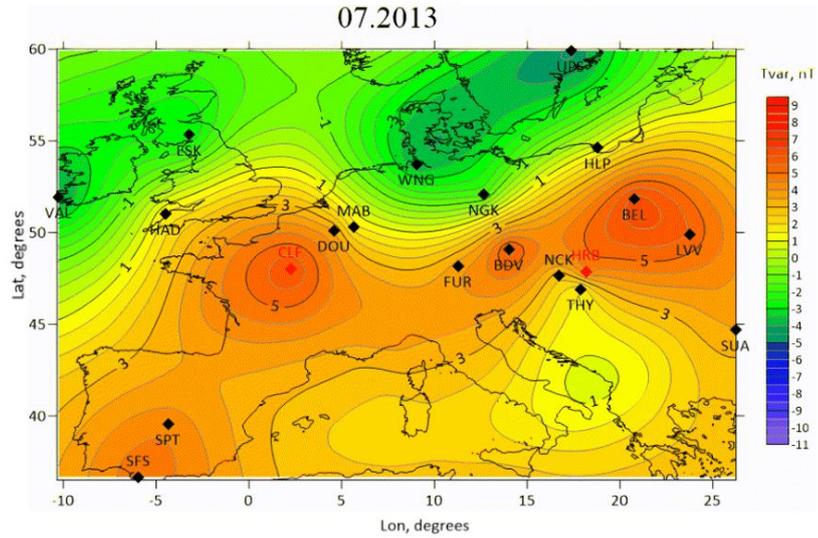
Таблица 3. Статистические характеристики результатов пространственного прогноза вариаций с использованием методов машинного обучения

Статистические характеристики	Методы машинного обучения, решающие задачу регрессии			
	Множественная линейная регрессия	Градиентный бустинг	Метод опорных векторов	Случайный лес
Среднее квадратическое отклонение, нТл (%)	1.31 (22.6)	2.29 (18.3)	2.25 (19.3)	1.63 (19.9)
Среднее отклонение, нТл (%)	-2.28 (39.2)	-2.46 (18.1)	0.06 (0.2)	-2.33 (28.4)

А



Б



В

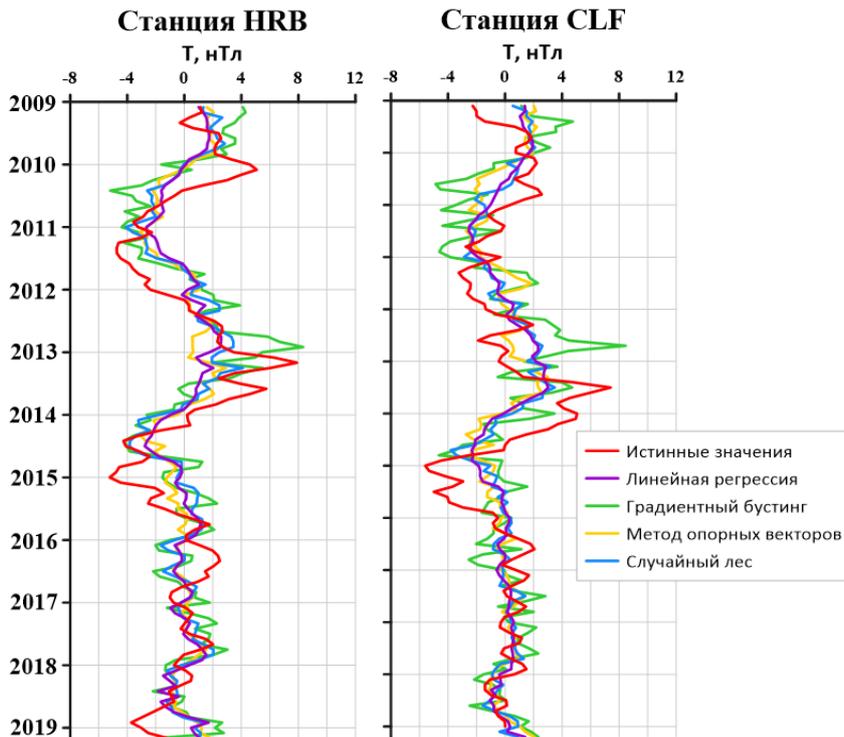


Рис. 6. Пространственный прогноз с использованием зависимой интерполяции: А – на август 2011 года; Б – на июль 2013 года; В - сравнение истинных значений геомагнитных вариаций и прогнозных для станций «Hurbanovo (HRB, Словакия)» и «Chambon-la-Forêt (CLF, Франция)»

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана классификация подходов прогноза геомагнитных вариаций в зависимости от размерности прогноза – временной одномерный, пространственный двумерный, пространственно-временной трехмерный. Методика прошла тесты на фактических данных, показавшие, что для каждого подхода применимы методы машинного обучения, в которых к прогнозу могут активно привлекаться дополнительные геофизические и геологические признаки. Для методов одномерного и двумерного прогноза существуют стандартные программные решения по задействованию методов машинного обучения. Для трехмерного прогноза такие решения ещё предстоит разработать.

Приведенные оценки качества прогноза в серии примеров демонстрируют принципиальную применимость методов машинного обучения в рассматриваемом вопросе. В среднем по всем расчетам получена относительная точность прогноза 20%, то есть в целом надежно устанавливаются тенденции и форма магнитных вариаций. Для повышения точности прогноза необходимо продолжить разработку направления, совершенствовать методы прогноза, оптимизировать выбор коэффициентов многомерной регрессии и дополнительных признаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка)/ М-во геологии СССР. – Л.: Недра, 1981. – 263 с.
2. Лыгин И.В., Арутюнян Д.А., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Кривошея К.В. Картирование магматических комплексов по данным гидромагнитных съемок Баренцевоморского региона // Физика Земли. 2023. № 4. С. 96 – 114. DOI: 10.31857/S0002333723040075.
3. Бабаянц П.С., Контарович О.Р. Комплексные аэрогеофизические работы на арктическом шельфе // «Neftegaz.RU». 2015. №7-8. С. 40 – 50.
4. Свидетельство 2023622956. Минутные измерения магнитовариационных обсерваторий сети INTERMAGNET за период с 1991 по 2018 год после обработки. База данных / Вишняков Д.Д., Брагина А.А., Арутюнян Д.А., Шклярчук А.Д. (RU); опубл. 28.08.2023.
5. International Real-time Magnetic Observatory Network [Электронный ресурс] URL: <https://www.intermagnet.org/>.
6. Модель нормального магнитного поля Земли IGRF-13 [Электронный ресурс] URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>.
7. Earth Magnetic Anomaly Grid (EMAG) 2 [Электронный ресурс] URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/emag2.html>.
8. Golden Software Surfer [Электронный ресурс] URL: <https://support.goldensoftware.com>.
9. Geosoft Oasis Montaj [Электронный ресурс] URL: <https://www.seequent.com>.
10. Буйначев С.К. Основы программирования на языке Python: учебное пособие / Буйначев С.К., Боклаг Н.Ю. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014, 91 с.
11. Миронов А.М. Машинное обучение, часть 1. Московский Государственный Университет, Механико-математический факультет, - М.: 2018, 84 с.
12. WGM2012 Global Model [Электронный ресурс] URL: <https://bgi.obs-mip.fr/data-products/grids-and-models/wgm2012-global-model/>.
13. Модель CRUST 1.0 [Электронный ресурс] URL: <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>.
14. The Moho depth of the European plate [Электронный ресурс] URL: <http://www.seismo.helsinki.fi/mohomap/>.
15. Global Heat Flow Database [Электронный ресурс] URL: <https://www.datapages.com/gis-map-publishing-program/gis-open-files/global-framework/global-heat-flow-database>.
16. Лыгин И.В., Арутюнян Д.А., Чепиго Л.С., Кузнецов К.М., Шклярчук А.Д. Методика построения структурных поверхностей по геолого-геофизическим данным на основе машинного обучения на примере реконструкции границы Мохо в Баренцевоморском регионе // Гелиогеофизические исследования. 2023. № 38. С. 3 – 16. DOI: 10.5425/2304-7380_2022_38_3.

METHODS FOR PREDICTING GEOMAGNETIC VARIATIONS

Lygin I.V., Bragina A.A., Vishnyakov D.D.

The article proposes a classification of approaches for spatial and temporal prediction of geomagnetic variations. Some of the approaches are based on the algorithms of machine learning. Depending on the type of forecast (temporal, spatial or spatio-temporal), considered sets of geological, geophysical and other information, which, according to the authors, provide an increase in the quality of the forecast. All stages of the forecast are described, including the collection and processing of a database of geomagnetic variations. The results of the forecast are demonstrated by several examples. In conclusion, the analysis of the results is made and the prospects for continuing research on this topic are noted.

KEYWORDS: MACHINE LEARNING, GEOMAGNETIC VARIATIONS, EARTH'S MAGNETIC FIELD, FORECASTING, MAGNETOVARIAION STATIONS, GEOLOGICAL AND GEOPHYSICS INFORMATION.