

9. Shipton Z.K., Cowie P.A. A conceptual model for the origin of fault damage zone structures in high-porosity sandstone // *Journal of Structural Geology*. – 2003. – V. 25, № 3. – P. 333-344. – DOI: 10.1016/S0191-8141(02)00037-8.
10. Тугарина М.А., Семинский К.Ж. Отражение пространственно-временных закономерностей разрывообразования в характере обводненности разломной зоны // *Внутренняя структура континентальных разломных зон: прикладной аспект* / [К.Ж. Семинский и др.]. – Новосибирск, 2005. – С. 94-112.
11. Cowie P.A. A healing-reloading feedback control on the growth rate of seismogenic faults // *Journal of Structural Geology*. – 1998. – V. 20, № 8. – P. 1075-1087. – DOI: 10.1016/S0191-8141(98)00034-0.
12. Прокопьев А.В., Фридовский В.Ю., Гайдук В.В. Разломы: (Морфология, геометрия и кинематика): учеб. пособие. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004. – 148 с.: ил.
13. Панжин А. А. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением спутниковой геодезии // *Маркшейдерия и недропользование*. – 2003. – № 2. – С. 43-54.
14. Корчемагин В.А. Геологическая структура и поля напряжений в связи с эволюцией эндогенных режимов Донбасса: дис. ... д.г.-м. н.: 04.00.04 / Корчемагин Виктор Александрович. – Москва, 1984. – 380 с.
15. Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2013. – Т. 4., № 2. – С. 83-117.
16. Акуленко Л.Д., Марков Ю.Г., Перепелкин В.В. Неравномерности вращения Земли // *Докл. Акад. наук*. – 2007. – Т. 417, № 4. – С. 483-488.
17. Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора-атмосфера // *Физика Земли*. – 2012. – № 2 – С. 14-16.

УДК 550.8.052

DOI:10.7242/echo.2023.1.15

МНОГОЭТАПНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

П.Н. Новикова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Обсуждаются стратегии многоэтапного прогнозирования при анализе магнитных вариаций на базе гибридной модели машинного обучения. Для реализации краткосрочных прогнозов применительно к циклической компоненте модели хорошо зарекомендовали себя прямая и рекурсивные стратегии. Оценена возможность множественного прогнозирования нерегулярной компоненты. Показаны результаты одношагового и многоэтапного прогнозирования на примере среднечасовых магнитных вариаций геомагнитной обсерватории г. Новосибирск.

Ключевые слова: многоэтапное прогнозирование, магнитные вариации, временные ряды, машинное обучение, гибридный алгоритм, одношаговый прогноз.

Анализ и прогнозирование магнитной активности в высоких широтах, а также в прибрежных зонах, где поведение магнитных вариаций показывает наиболее нерегулярный, изменчивый характер [1, 3, 5], является важной задачей как собственно всестороннего исследования природы магнитных вариаций и геомагнитных бурь, так и производственных задач, связанных с оценкой магнитного поля в краткосрочной и среднесрочной перспективах (например, бурение скважин по навигации по магнитному полю, работы железнодорожного транспорта и т.д. [5]).

В данной статье для построения краткосрочных прогнозных значений магнитных вариаций, представляющих собой временной ряд [2], используется базовая гибри-

ная модель машинного обучения, представленная в работе [4]. При использовании комбинации линейных и авторегрессионных методов происходит последовательное моделирование трендовой, сезонной, циклической и случайной компонент. Перед обучением данные о магнитных вариациях обрабатываются: заполняются отсутствующие значения, из данных убираются резкие «выскоки» (не более 5% от общего количества точек регистрации). По сравнению с предыдущей версией гибридной модели [4], были улучшены сезонные параметры, а также автокорреляционные и статистические признаки, используемые для вычисления циклической составляющей. Качество модели последовательно для каждой компоненты оценивается с помощью метода наименьших квадратов.

Стратегии многошагового прогнозирования. Обычно предсказание (экстраполяция) временных рядов дает возможность предсказать значение ряда только на следующем временном шаге. Рассмотрим несколько стратегий прогнозирования временных рядов, позволяющих получить оценку значений на несколько шагов вперед (рис. 1).

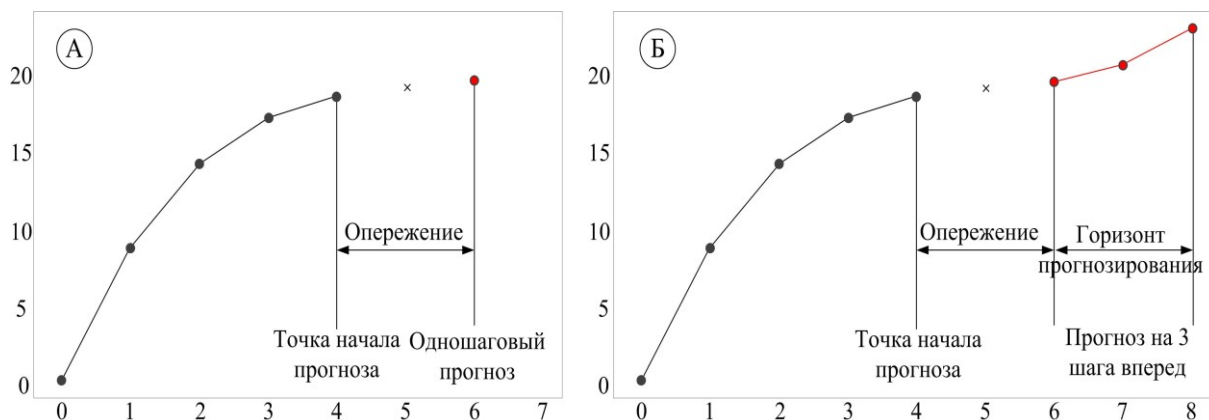


Рис. 1. Принцип одношаговой (А) и многошаговой (Б) стратегии прогнозирования временных рядов

1. **Рекурсивная стратегия** многократно использует одношаговую модель для построения единичных прогнозов, в которой прогноз для предыдущего временного шага используется в качестве входных данных для создания прогноза на следующем временном шаге. В такой стратегии горизонт событий (интервал времени, для которого необходимо получить данные или, по-другому, нужное количество шагов вперед (рис. 1Б) может быть «бесконечно» длительным, однако присутствует эффект накопления предыдущих ошибок в данных.

2. **Прямая стратегия** предполагает построение множества моделей, которые обучаются на каждую отдельную точку горизонта, т.е. первая модель обучается прогнозировать на 1 шаг вперед, вторая модель – на 2 шага вперед и т.д. Данная стратегия гораздо меньше подвержена накоплению ошибок, однако хуже применима для среднесрочных и долгосрочных прогнозов.

3. **Прямо-рекурсивные гибридные стратегии** объединяют два предыдущих метода: строится серия моделей для отдельных прогнозов, использующих прошлые предсказания базовой модели в качестве входных значений. При такой стратегии нет ограничений на выбор периода горизонта предсказания.

4. **Множественная (мульти) стратегия** включает в себя разработку одной модели, которая способна прогнозировать всю последовательность прогноза в один прием.

Каждая из этих стратегий реализуется при помощи библиотеки `scikit learn` [6]. Первые три стратегии для обучения используют метод градиентного бустинга. Мультистратегия основывается на применении методов нейронного обучения.

Если рассматривать базовую гибридную модель, то наиболее устойчивыми компонентами являются тренд и сезонная компонента, связанная с солнечно-суточными, 27-дневными и собственно сезонными вариациями [3]. Для данных компонент применялись методы, использующие линейную регрессию, их предсказание довольно устойчиво. Методы авторегрессии, использующие серию предыдущих значений исходного ряда магнитных вариаций – лаги, применялись для построения циклической и случайной характеристик. Циклическая компонента в магнитных вариациях является неустойчивой и нерегулярной, поэтому именно для нее имеет значение построение многоэтапного прогноза, т.к. наиболее сильна зависимость от ближайших значений, выявленная по частичной автокорреляции.

На данном этапе в алгоритм отдельно для циклической компоненты внедрены три стратегии многоэтапного прогнозирования: мультистратегия, прямая и рекурсивная. Такой подход поможет оценить возможности многоэтапного прогнозирования для моделирования различных вариантов поведения нерегулярной компоненты. Для новых моделей машинного обучения был сформирован вектор признаков для многоэтапной модели, состоящей из серии запаздываний статистик, соответствующей периоду горизонта предсказаний, который можно регулировать. Стоит отметить, что выбор горизонта прогнозирования влияет на количество и интервалы вычисляемых лагов.

Практический пример. Одношаговый и многошаговые прогнозы были выполнены для среднечасовых магнитных вариаций, измеренных обсерваторией г. Новосибирск в 2016-17 гг. (материалы сайта <http://www.wdcb.ru/> Мирового центра данных по солнечно-земной физике, г. Москва). В качестве обучающей и проверочных выборок использовались значения 2016 г., прогнозирование значений осуществлялось для первых двух суток 2017 г. Одношаговый прогноз довольно устойчиво показывает основные тенденции в данных (рис. 2). Средняя квадратическая ошибка для одношагового прогноза составила 3.25 нТл. Следует отметить, что прогнозирование ведется для неочищенных данных, тогда как модель обучается на подготовленном наборе данных. Поэтому особый интерес вызывает способность многоэтапных моделей предсказывать резкие отклонения.

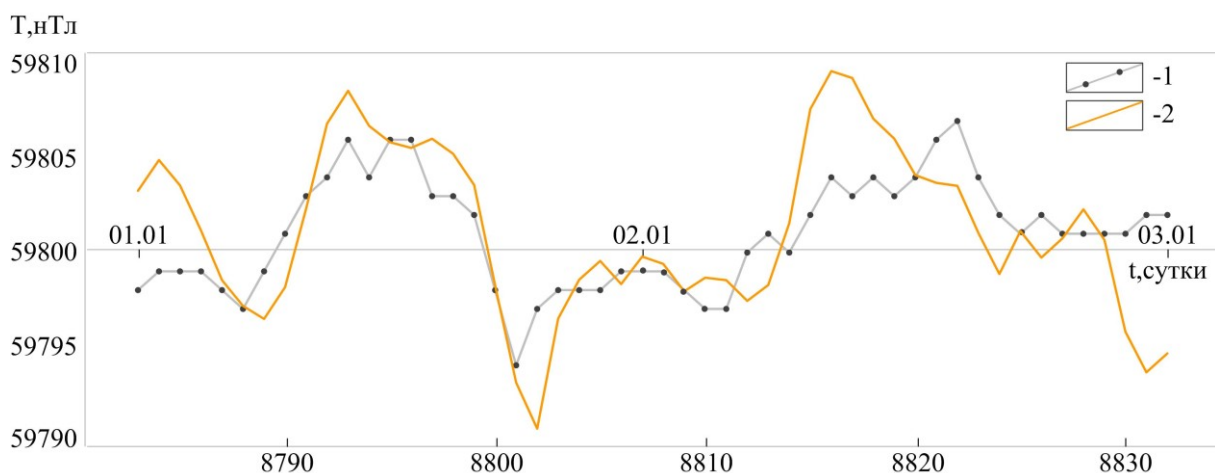


Рис. 2. Одношаговый прогноз магнитных вариаций на 2 суток вперед (48 шагов)

Многоэтапный прогноз был выполнен по трем стратегиям с горизонтом 6 шагов для циклической компоненты. Результаты моделирования циклической компоненты включались в прогноз базовой модели, т.е. суммировались результаты одношаговых прогнозов по трендовой, сезонной и случайной компонентам с включением многошагового прогноза циклической характеристики. Стоит отметить, что базовая модель на выбранных данных с выбранным количеством и интервалом лагов наиболее хорошо выполняет краткосрочные прогнозы. Среднеквадратическая ошибка на валидационной выборке для каждого метода не превышает 2 нТл, а на обучающей – 1 нТл. Общая многошаговая модель наследует накопление ошибок базовой модели, что можно наблюдать в резких несоответствиях морфологии магнитных вариаций на некоторых участках прогнозирования.

Для каждой стратегии предсказания значений на несколько шагов вперед оценивался размах между минимальным и максимальным значениями, полученными для каждой точки прогноза (рис. 3). Картина доверительного интервала по всем трем стратегиям оказалась довольно близка, средний размах составил порядка 6-7 нТл. Морфология доверительного интервала близка к одношаговому прогнозу и истинным значениям.

На рисунке 4 показаны результаты многоэтапного моделирования магнитных вариаций – каждая отдельная цветная линия показывает 6-шаговый прогноз. При прямой и рекурсивной стратегиях наблюдается довольно близкая к друг другу морфология прогнозов для каждой точки. Тогда как мультистратегия способна резко менять конфигурацию прогноза на последних точках.

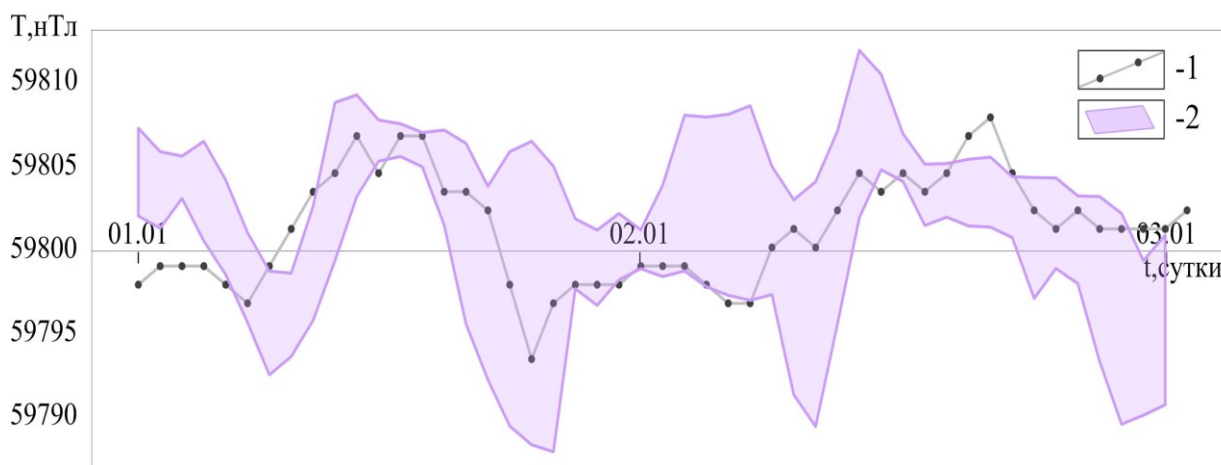


Рис. 3. Общий размах значений при многоэтапном прогнозировании магнитных вариаций на примере рекурсивной стратегии

Основные выводы. Многоэтапные стратегии прогнозирования для представленной гибридной модели позволяют получать краткосрочные прогнозы на несколько шагов вперед, основываясь на прошлых регистрациях магнитных вариаций. При этом такие стратегии позволяют получать некоторый доверительный интервал значений, моделирующий возможные отклонения вариаций от «базовой» линии – относительно спокойных периодических изменений данных. Мультистратегия дает большие ошибки в морфологии, чем прямая и рекурсивная, что еще раз показывает некоторую автокорреляционную зависимость магнитных вариаций, которую необходимо использовать при моделировании нерегулярных компонент вариаций.

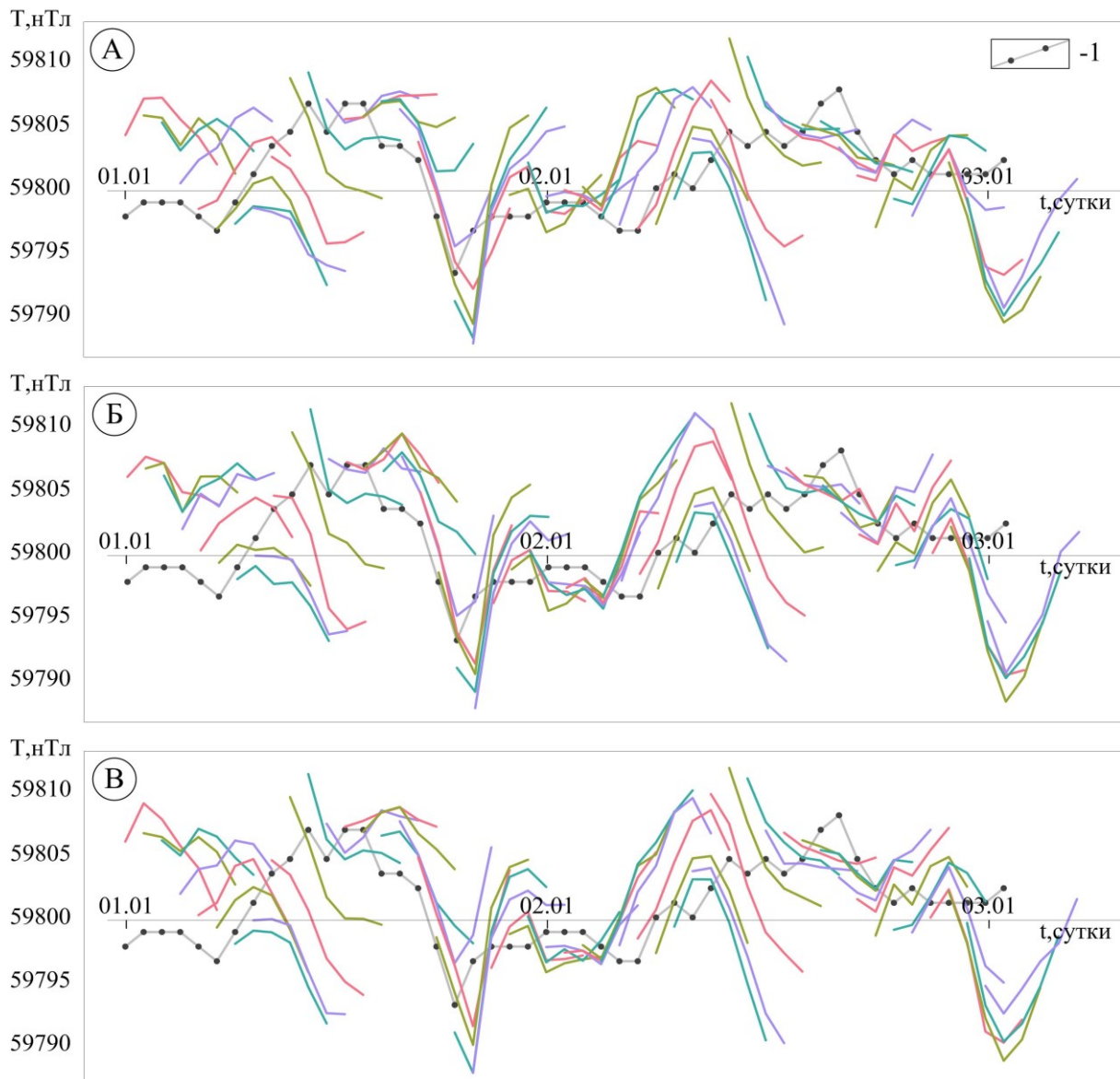


Рис. 4. Многоэтапный прогноз магнитных вариаций на горизонт 6 шагов вперед:
 А – рекурсивная стратегия; Б – прямая стратегия; В – мультистратегия
 (1 – тестовая выборка, цветными линиями обозначены прогнозы для каждой точки)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю., Соловьев А.А. Геомагнетизм: от ядра Земли до Солнца. – М.: РАН, 2019. – 185 с.: ил.
2. Лоскутов А.Ю.. Анализ временных рядов. Курс лекций // Нелинейная динамика, теория динамического хаоса и синергетика: идеи и перспективы. – Текст электронный. – URL: https://chaos.phys.msu.ru/loskutov/PDF/Lectures_time_series_analysis.pdf (дата обращения: 30.03.2023).
3. Магниторазведка: справ. геофизика / под ред. В.Е. Никитского, Ю.С. Глебовского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 469 с.
4. Новикова П.Н. Восстановление данных магнитных вариаций гибридным алгоритмом машинного обучения // Горное эхо. – 2022. – № 3 (88). – С. 25-33. – DOI: 10.7242/echo.2022.3.5.
5. Соловьев А.А. Некоторые задачи геомагнетизма, решаемые по данным магнитных обсерваторий и спутниковых наблюдений // Добрецовские чтения: наука из первых рук: Материалы 1 Всерос. науч. конф. – Новосибирск, 2022. – С. 306.
6. Python и машинное обучение: машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn и TensorFlow 2: пер. с англ. – 3-е изд. – СПб.: ООО «Диалектика», 2020. – 848 с.