

УДК 550.3

Палеомагнетизм ордовикского разреза Мишина Гора (Псковская область): запись древнего геомагнитного поля и ограничения на возраст Мишиногорской взрывной структуры*

В. Э. Павлов^{1,2}, А. М. Пасенко¹, А. В. Дронов^{2,3}, С. П. Чернышов¹

¹ Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН,
Российская Федерация, 123242, Москва, Большая Грузинская ул., 10

² Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Российская Федерация, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18

³ Геологический институт РАН,
Российская Федерация, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7

Для цитирования: Павлов, В. Э., Пасенко, А. М., Дронов, А. В., Чернышов, С. П. (2022) Палеомагнетизм ордовикского разреза Мишина Гора (Псковская область): запись древнего геомагнитного поля и ограничения на возраст мишиногорской взрывной структуры. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 67 (1), 4–19.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.101>

Выполнены палеомагнитные исследования ордовикских пород, участвующих в строении Мишиногорской взрывной структуры (Гдовский район, Псковская область). По результатам температурной магнитной чистки выделены две стабильные компоненты намагниченности S и P, имеющие сходные диапазоны разблокирующих температур (~200–600 °C), но статистически значимо различающиеся по направлению. Региональный тест складки указывает на послескладчатый возраст компоненты S и доскладчатый возраст компоненты P. Доскладчатый возраст компоненты P поддерживается также положительным результатом теста складки, выполненным в масштабах изученного обнажения. Сравнение палеомагнитного полюса, рассчитанного по компоненте S, с кривой кажущейся миграции полюса для Восточно-Европейской

* Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 20-17-00198 (сбор, анализ и интерпретация данных) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по договору № 14.Y26.31.0029 в рамках реализации постановления Правительства Российской Федерации № 220 (подготовка статьи).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2022

платформы определенно указывает на позднепермский-раннетриасовый возраст этой компоненты, что в комплексе с имеющимися геологическими наблюдениями определяет временной диапазон формирования Мишиногорской структуры как ~370–250 млн лет назад. Древняя компонента намагниченности R имеет то же направление, что и считающиеся первичными компонентами, выделенные ранее в ряде одновозрастных разрезов Северо-Запада России, Эстонии и Скандинавии. Соответствующие палеомагнитные полюсы широко используются при построении палеозойских геодинамических и тектонических реконструкций с участием палеоконтинента Балтика. Положительный результат теста складки для компоненты R подтверждает правомерность использования этих полюсов для палеореконовструкций. Для стратиграфического интервала, включающего верхи флоского, дапинский и нижние 2/3 дарривильского яруса, построен магнитостратиграфический разрез, содержащий единственную магнитозону, отвечающую обратной полярности геомагнитного поля. Таким образом, магнитостратиграфические данные не подтверждают гипотезу о существовании интервалов прямой полярности внутри Ордовикского геомагнитного суперхрона обратной полярности (суперхрон Мойеро).

Ключевые слова: ордовикский суперхрон, палеомагнетизм, Мишина гора, суперхрон Мойеро, ордовик.

1. Введение

В настоящей работе представлены результаты палеомагнитных исследований ордовикских карбонатных пород, вскрытых в карьере на окраине бывшей деревни Мишина Гора (Гдовский район, Псковская область, 58°34'10" с. ш., 28°05'16" в. д.). Ордовикские отложения, слагающие этот разрез, участвуют в строении локальной (4 × 2.5 км) Мишиногорской структуры, центральная часть которой образована агломерато-брекчиевым комплексом, включающим в том числе породы фундамента, а внешняя сформирована дислоцированными породами кембрия, ордовика и девона (псковский горизонт, фаменский ярус). Структура расположена среди сплошного поля полого (почти горизонтально) залегающих девонских отложений.

Долгое время мишиногорские дислокации объяснялись ледниковой гипотезой: считалось, что обсуждаемые породы слагают крупный ледниковый отторженец, принесенный сюда ледником из Скандинавии (Чихачев и Некрасов, 1937; Балашов, 1960). Высказывалось также мнение, согласно которому Мишиногорская структура является древним метеоритным кратером (Масайтис и др., 1980). В последние годы, благодаря данным бурения и детальным геолого-геофизическим и геохимическим исследованиям, утвердилась точка зрения, высказанная впервые еще в 1930-е годы первооткрывателем структуры Б. П. Асаткиным (Асаткин, 1938), о взрывном, связанном с магматизмом происхождении структуры. Полученные на настоящий момент данные позволяют предположить существование в районе Мишиногорской структуры нескольких, возможно, алмазоносных, кимберлитовых трубок взрыва (Буслович и др., 2004).

В силу особенностей залегания (углы падения пород здесь достигают 70°), литологических характеристик (обилия первично красноцветных пород) и хорошей привязки к биостратиграфической шкале разрез ордовикских отложений в районе бывшей деревни Мишина Гора представляет очевидный интерес для получения магнитостратиграфической информации, необходимой для изучения эволюции геомагнитного поля в ордовике.

Летом 2020 г. нами были выполнены палеомагнитные исследования этого разреза. При этом ставились следующие задачи:

- 1) установить древнюю остаточную намагниченность ордовикских пород и впервые выполнить тест складки, который позволит проверить надежность ордовикского палеомагнитного направления, выделенного ранее в других ордовикских разрезах региона и рассматриваемого в настоящее время в качестве первичного. Поскольку палеомагнитные полюсы, отвечающие этому палеомагнитному направлению, широко используются в планетарных геодинамических реконструкциях (Torsvik et al., 2012), необходимость такого теста очевидна;
- 2) получить магнитостратиграфическую характеристику разреза, что позволит тестировать гипотезу о существовании внутри ордовикского суперхрона обратной полярности Мойеро кратковременных интервалов прямой полярности. Эти данные необходимы для разработки физической теории геомагнитного поля;
- 3) получить палеомагнитную информацию, которая позволит уточнить верхнее ограничение на возраст Мишиногорской структуры (что необходимо, в частности, для оценки результатов теста складки).

2. Стратиграфия и фации

Впервые о выходах дислоцированных ордовикских (в то время считавшихся нижнесилурийскими) пород в Псковской области, в карьере у деревни Мишина Гора (рис. 1 и 2), стало известно в 1931 г. (Асаткин, 1938).

В дальнейшем в ходе детального изучения в разрезе были установлены основные традиционные стратиграфические подразделения, характерные для ордовика приглинтовой полосы России и Эстонии (оболовый песчаник, глауконитовый песчаник, глауконитовый известняк, ортоцератитовый известняк и эхиносферитовый известняк). Однако было отмечено, что по своим литологическим характеристикам (красноцветность пород), мишиногорский разрез более напоминает ордовик Швеции, чем ордовик, известный по обнажениям в России и Эстонии (Асаткин, 1938).

В ходе программы бурения, развернувшейся в послевоенные годы на Северо-Западе России и в Прибалтике, выяснилось, что шведские красноцветные фации заходят в виде языка на территорию Латвии, южной Эстонии и Псковской области России (Мянниль, 1966). Мишиногорский разрез располагается как раз

Рис. 1. Разрез Мишина Гора (Дронов, 2004):

1 — кварцевые пески с ожелезненными трещинами в кровле; 2 — кварцевые пески с рассеянными в них обломками раковин фосфатных брахиопод; 3 — кварц-глауконитовые пески и песчаники; 4 — доломиты; 5 — толстослоистые известняки; 6 — тонкослоистые известняки; 7 — пласты известняка, разделенные глинистыми пропластками; 8 — глинистые известняки; 9 — глинистые мергели; 10 — красный мергель; 11 — красноцветные отложения; 12 — рассеянные в породе железистые оолиты; 13 — раковины головоногих моллюсков; 14 — зерна глауконита; 15 — эхиносфериты; 16 — поверхности твердого дна. Точки под символами P и S отмечают положение в разрезе образцов, содержащих, соответственно, P и S компоненты. Цифры слева от литологической колонки обозначают мощность, цифры в кружках справа от литологической колонки — номера слоев



Рис. 2. Ордовикский разрез в карьере вблизи бывшей деревни Мишина Гора. На фото приведен фрагмент разреза кундаского, азериского и ласнамягиского горизонтов. На дальнем плане крайний слева (частично закрыт листвой) — слой № 11 (красноцветный) и далее последовательно все вышележащие слои. На переднем плане — пограничный интервал азери-ласнамяги. Крайний справа — слой № 33 (глинистый). В целом виден интервал слоев с № 11 по № 33 (фото авторов)

в переходной полосе между более глубоководными типично скандинавскими красноцветными и более мелководными типично северо-эстонскими сероцветными фациями (Мянниль, 1966). В результате проведенных в 1997 и 2000–2003 гг. исследований (Дронов, 2004) было установлено, что мишиногорский разрез ближе всего может быть сопоставлен с разрезом, вскрытым скважиной, пробуренной в районе г. Хаапсалу в юго-западной Эстонии. Так же как и в Южной Эстонии, в мишиногорском разрезе легко распознаются свиты, выделенные на территории Латвии (Дронов, 2004).

Послойное описание разреза приведено в работе А. В. Дронова (Дронов, 2004). Биостратиграфическая привязка к горизонтам региональной стратиграфической шкалы Балтоскандии осуществлялась по трилобитам (определения А. Ю. Иванцова, см. рис. 1), конодонтам (Толмачева, 2004) и остракодам (Мельникова, 2004). Исследования распределения изотопов углерода по разрезу подтверждают корреляцию с региональной и Международной шкалой ордовика (Ainsaar et al., 2020).

3. Результаты палеомагнитных исследований

3.1. Отбор образцов и методика лабораторных исследований

В июне 2020 г. из нижней части мишиногорского разреза, отвечающей верхам флоского, дапинскому и большей части дарривильского ярусов и имеющей мощность 22.5 м, было отобрано 116 ориентированных образцов с интервалом отбора от 2 до 30 см (см. рис. 1). Опробованный интервал разреза формировался между ~475 и 460 млн лет назад.

Отбор кернов осуществлялся механическим пробоотборником системы Romeroy. В тех случаях, когда воспользоваться механическим пробоотборником было невозможно, вручную отбирались ориентированные штуфы. Ориентировка образцов осуществлялась магнитным компасом с последующей корректировкой на магнитное склонение в районе работ.

Лабораторные исследования коллекции и обработка полученных данных производились в рамках стандартной палеомагнитной процедуры (Храмов и др., 1982; Butler, 1998; Tauxe, 2010) в лаборатории Главного магнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН с использованием всего необходимого, отвечающего современным требованиям лабораторного оборудования (Лаборатория...). Магнитная чистка выполнялась с использованием термодемагнетайзера MMTD80 (производство Magnetic Measurements Ltd., Великобритания) в специальной комнате, экранированной от внешнего магнитного поля, измерения остаточной намагниченности производились в этой же комнате на криогенном магнитометре производства 2GEnterprise (США). Всего, в зависимости от характера палеомагнитной записи, выполнялось от 12 до 15 шагов чистки вплоть до температур, при которых либо начинались хаотические изменения измеряемых направлений, либо уровень сигнала становился соизмеримым с уровнем шума измерительного прибора.

3.2. Выделение компонент намагниченности

По результатам температурной магнитной чистки в изученных образцах выделяются две стабильные компоненты намагниченности. Первая из них — компонента P (обр. 4 и 60 на рис. 3, а; верхняя пара стереограмм на рис. 3, б) — имеет крутые положительные наклонения и преимущественно восточные — юго-восточные склонения в древней системе координат и северо-восточные склонения и умеренно положительные наклонения в современной системе координат (табл. 1). Максимальные разблокирующие температуры этой компоненты в большинстве образцов лежат в интервале от 510 до 630 °С.

Вторая — компонента S — характеризуется отрицательными умеренными наклонениями и северо-западными склонениями в древней системе координат и умеренными отрицательными наклонениями и юго-западными склонениями в современной системе координат (табл. 1, обр. 2 и 46 на рис. 3, а; нижняя пара стереограмм на рис. 3, б). Практически полное разрушение этой компоненты происходит в диапазоне 500–600 °С.

Распределение векторов, отвечающих первой и второй компонентам, показано на рис. 3, б. Совместное нахождение этих компонент в одних и тех же образ-

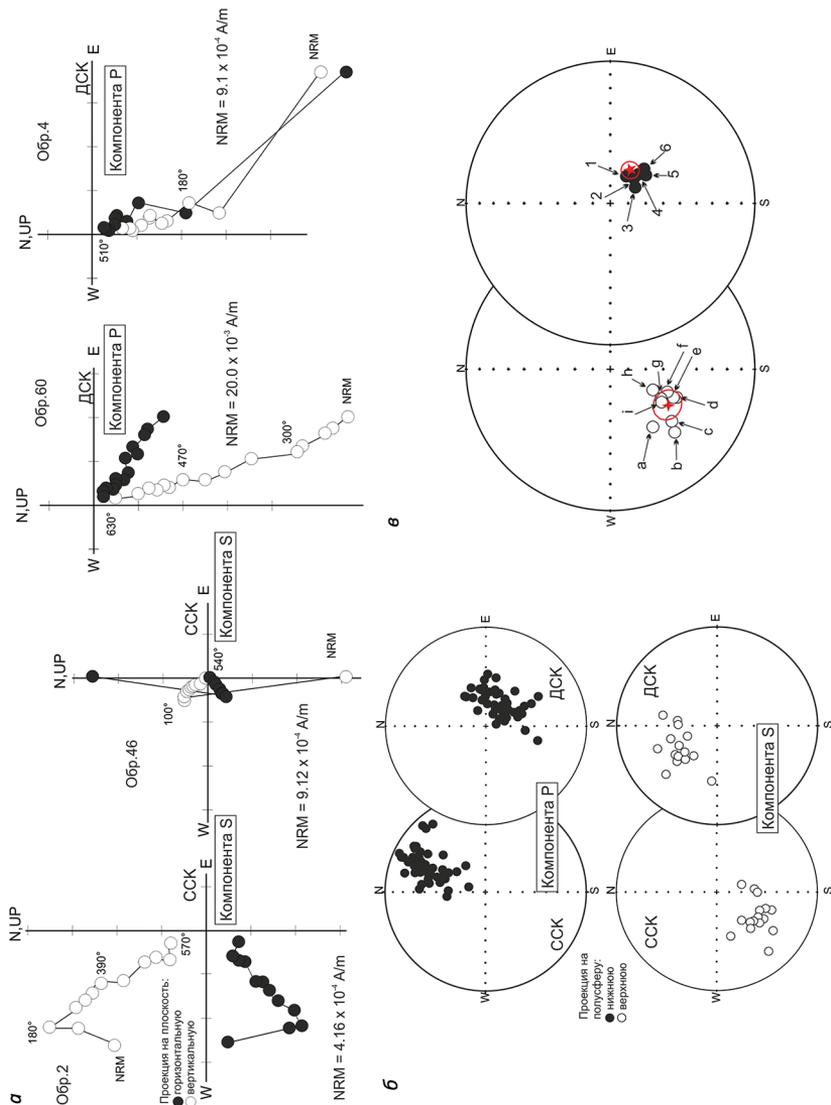


Рис. 3. Результаты магнитных чисток и выделенные палеомагнитные направления:

a — диаграммы Зийдерильда, иллюстрирующие результаты температурной магнитной чистки; *б* — стереограммы, иллюстрирующие распределение палеомагнитных направлений компонент S и P в разрезе Мишина Гора; *в* — сравнение средних направлений компонент S и P (четырёх- и пятилучевые звезды; соответственно, в современной и древней системах координат) с направлениями аналогичных компонент, выделенных в ряде разрезов арениста и лланвирна Северо-Запада России и Скандинавии: 1 — (Smethurst et al., 1998), 2 — (Perroud et al., 1992), 3 — (Claesson, 1978), 4 — (Гуревич и др., 2005), 5 — (Torsvik et al., 1995); *а*, *в* — (Храмов, Иосифиди, 2009), *с* — (Torsvik, Rohnstrom, 2003), *д*, *г*, *и* — (Гуревич и др., 2005), *е*, *ф* — (Smethurst et al., 1998), *h* — (Torsvik and Trench, 1991); CCK — современная система координат; ДСК — древняя система координат

цах в ходе экспериментов по размагничиванию отмечено не было. Во всех образцах, где эти компоненты были обнаружены, они являются характеристическими (в смысле, наиболее стабильными) (рис. 3, а). Тест складки (локальный) в модификации DC (Enkin, 2003) для первой компоненты дает положительный результат (параметр DC slope = 0.730 ± 0.561), для второй — неопределенный (параметр DC slope = 0.611 ± 0.979). Векторы, отвечающие средним направлениям этих компонент, взятые в одной системе координат (стратиграфической или географической) ложатся в противоположные четверти стереограммы (табл. 1). Это может быть истолковано как указание на то, что речь идет не о двух разновозрастных компонентах, а об одной биполярной компоненте.

Таблица 1. Палеомагнитные направления, выделенные в разрезе Мишина Гора, и сравнение их с древними компонентами намагниченности, определенными в разрезе р. Тосны

Компонента	N	Dg	Ig	K	alfa95	Ds	Is	K	alfa95	Plat	Plong	A95
Разрез Мишина Гора (настоящая работа)												
P	44	24.8	35.8	18.1	5.2	120.6	67.9	19.2	5.0	30.7	66.2	7.6
S	16	212.6	-51.8	20.8	8.3	327.6	-53.2	21.3	8.2	-56.8	334.7	10.1
Разрез реки Тосны (Smethurst et al., 1998)												
P	37	124.5	71.3	55.9	3.2	130.4	73.1	44.9	3.6	34.7	59.1	5.2
S	28	215.0	-56.1	66.3	3.4	223.7	43.7	31.1	5.0	-57.8	330.5	4.1

Примечание. В таблице введены обозначения: N — число образцов (стратиграфических уровней), по которым выделены компоненты намагниченности; Dg, Ig, Ds, Is — средние склонения и наклонения компонент в географической и стратиграфической системах координат; K — кучность направлений; alfa95 — круги доверия на уровне 95% для средних направлений; Plat и Plong — координаты (широта и долгота рассчитанных палеомагнитных полюсов); A95 — радиус их кругов доверия.

Такое предположение, однако, опровергается, во-первых, отрицательным результатом теста обращения Макфаддена — МакЭлхинни — $\gamma/\gamma_{кр} = 16.2^\circ/9.8^\circ$ (McFadden and McElhinny, 1990) и, во-вторых, тем, что в современной (географической) системе координат отрицательное наклонение среднего направления второй компоненты по абсолютной величине значительно больше, чем абсолютное значение положительного наклонения среднего направления первой компоненты, что исключает объяснение неантиполярности этих компонент через частичное современное перемагничивание; об этом же говорит тот факт, что большой круг, проведенный через средние направления первой и второй компоненты в современной системе координат, проходит на заметном расстоянии от современного перемагничивания. Известное в регионе пермское перемагничивание (Preeden et al., 2009) также (в случае его наложения на исходное биполярное ордовикское распределение) должно приводить к менее крутому отрицательному наклонению, а не наоборот, как мы видим в наших данных.

3.3. Интерпретация выделенных компонент и региональный тест складки

Интерпретация выделенных компонент намагниченности базируется на многочисленных данных предшествующих палеомагнитных исследований ордовика Северо-Запада России, Швеции и Эстонии, обобщенных в работе (Храмов и Иосифиди, 2009) и полученных позже (Grappone et al., 2017; Plado et al., 2016). В этих работах показано, что компонента с крутыми положительными наклонениями [вслед за М. А. Сметарстом (Smethurst et al., 1998) будем называть ее компонента Р (primary)] является первичной и сформировалась либо во время, либо вскоре после образования рассматриваемых ордовикских пород. При анализе мишиногорских данных важно, что эта компонента здесь определяется в древней (стратиграфической) системе координат. Ее среднее направление в древней системе координат находится в непосредственной близости от направлений первичной ордовикской компоненты, полученной в предшествующих исследованиях (см. стереограмму на рис. 3, в), и однозначно отличается от них при сравнении в современной системе координат (см. табл. 1). В частности, угловые расстояния между средним направлением компоненты Р в разрезе Мишина Гора и в разрезах Ленинградской области (Smethurst et al., 1998) в стратиграфической и в географической системах координат составляют 3.7 и 59.3° при соответствующих критических углах 6.2 и 6.3° (McFadden and McElhinny, 1990). При пересчете направления компоненты Р (Smethurst et al., 1998) на координаты мишиногорского разреза эти угловые расстояния при тех же критических углах составляют 3.5 и 56.7°.

Приведенное выше сравнение составляет положительный результат регионального теста складки и определенно указывает на то, что компонента Р сформировалась до дислокаций. Положительный результат теста складки дает дополнительную мощную поддержку выводу о первичной природе Р-компоненты.

Важно отметить, что в современной системе координат направление компоненты Р мишиногорского разреза близко к направлению пермского перемагничивания, описанного в работе (Preeden et al., 2009) для кристаллических пород фундамента южной Финляндии. Это наблюдение могло бы иметь своим следствием предположение о пермском послескладчатом возрасте компоненты Р мишиногорского разреза. Однако положительный результат локального теста складки позволяет отвергнуть это предположение.

Отметим также, что совпадение направления древней компоненты намагниченности, выделенной в изученном разрезе, с направлением древней компоненты, определенным по другим одновозрастным разрезам региона, совершенно определенно противоречит ледниковой гипотезе происхождения Мишиногорской структуры.

Вторая компонента (как и в работе М. А. Сметарста (Smethurst et al., 1998), назовем ее компонента S (secondary)) также неоднократно описывалась в ордовикских породах северо-запада Восточно-Европейской платформы. М. А. Сметарст с соавторами (Smethurst et al., 1998) предположительно связывают ее формирование с преобразованием железосодержащих минералов в гетит и гематит в приповерхностных условиях. В разрезе Мишина Гора она определяется как послескладчатая, поскольку в современной (географической) системе координат имеет практически то же направление, что и в других разрезах региона (см. левую стереограмму

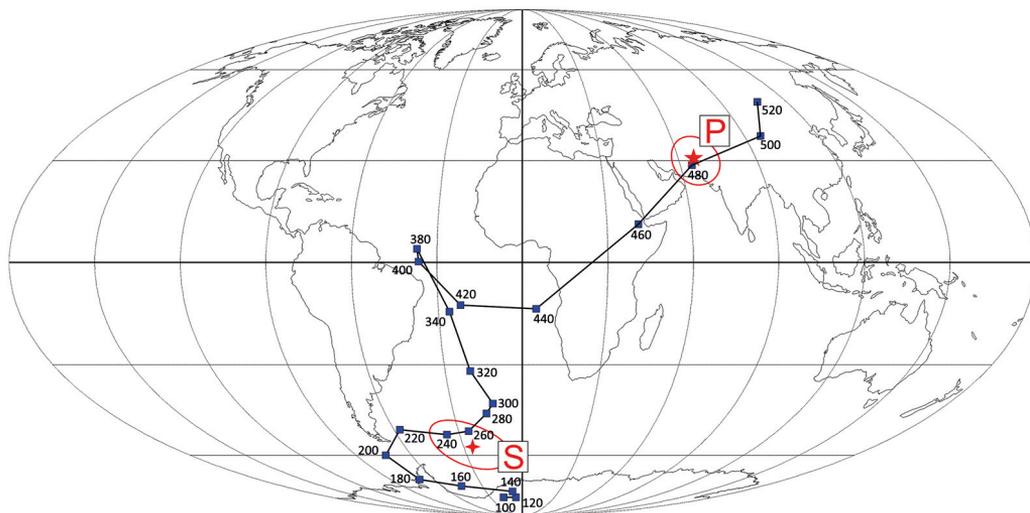


Рис. 4. Сопоставление палеомагнитных полюсов, отвечающих компонентам P и S (пяти- и четырехлучевые звезды соответственно), с траекторией кажущейся миграции полюса для Балтики (осреднение с окном 20 млн лет последовательности полюсов, представленной в табл. 4 из работы (Torsvik et al., 2012)

на рис. 3, в), а в стратиграфической системе координат резко от них отличается (см. табл. 1). В частности, угловые расстояния между средним направлением компоненты S в разрезе Мишина Гора и средним направлением одноименной компоненты в разрезах Ленинградской области (Smethurst et al., 1998) в стратиграфической и в географической системах координат составляют 57.6 и 5.2°, при соответствующих критических углах 7.4 и 7.5° (McFadden and McElhinny, 1990).

Выполненное сравнение означает, что компонента S моложе дислокаций, следовательно, ее возраст может быть использован для ограничения сверху времени формирования Мишиногорской структуры. Возраст компоненты S определяется при сравнении соответствующего ей палеомагнитного полюса с референтной траекторией кажущейся миграции полюса (ТКМП), имеющейся для Восточно-Европейской платформы (Torsvik et al., 2012). Этот полюс четко ложится на позднепермский — раннетриасовый сегмент ТКМП (рис. 4), ясно указывая, что компонента S образовалась примерно 250 млн лет назад, вблизи границы палеозоя и мезозоя.

Поскольку в ряде исследований (см. обзор в работе (Храмов и Иосифиди, 2009)) эта компонента имеет как прямую, так и обратную полярность, можно уверенно считать, что ее формирование происходило после завершения Каменноугольно-пермского суперхрона Киама, т. е. ее возраст моложе ~267 млн лет. Таким образом, наши новые палеомагнитные данные позволяют определить верхнее ограничение на возраст Мишиногорской структуры и в комплексе с имеющимися геологическими наблюдениями определяют временной диапазон формирования последней как ~370–250 млн лет назад.

4. Обсуждение результатов

Итак, положительный результат теста складки для компоненты Р показывает, что эта компонента совершенно определенно сформировалась до времени дислокаций пород, приведших к формированию Мишиногорской структуры. Поскольку, согласно нашим данным, эта структура сформировалась раньше конца пермского периода, соответственно, этот рубеж мы можем уверенно рассматривать в качестве верхнего ограничения на возраст Р-компоненты. Хотя полученный результат и не подтверждает окончательно вывод о первичности компоненты Р, он существенно повышает надежность этого вывода.

Значительная часть разреза Мишина Гора формировалась во время ордовикского суперхрона обратной полярности (суперхрона Мойеро (Pavlov and Gallet, 2005)) — периода времени, в течение которого процесс смены геомагнитной полярности, обычный для большинства других геологических эпох, полностью или почти полностью прекратился. Для изучения истории геомагнитного поля и для разработки теории геодинамо важно знать, происходила ли в этот интервал времени полная остановка инверсионного процесса либо на фоне значительного преобладания поля обратной полярности могли существовать отдельные кратковременные эпохи прямой полярности. Данные на этот счет противоречивы, следовательно, новая информация, полученная нами по разрезу Мишина Гора, представляет существенный интерес для решения этого вопроса.

Доказательство существования суперхрона Мойеро (ордовикского суперхрона обратной полярности) в настоящее время базируется на большом массиве магнитостратиграфических данных, полученных по многочисленным разрезам Сибири, Скандинавии, Эстонии и Северо-Запада России. Между тем, если для флоскодапинской (аренигской) части магнитостратиграфической записи совпадение данных о магнитной полярности для разных разрезов является практически абсолютным, то для дарривильской (лланвирнской) части имеется некоторое противоречие, состоящее в том, что в отдельных исследованиях в средней части дарривила (лланвирна) отмечается наличие одной маломощной зоны прямой полярности, отсутствующей в других разрезах (Лубнина и др., 2005 и ссылки ниже).

Наличие такой зоны прямой полярности описано в шведских разрезах Gullhögen и Hällekis (Torsvik et al., 1995; Torsvik and Trench, 1991), где оно подтверждается крайне малым числом образцов, характеризующихся низким качеством палеомагнитного сигнала. Однако, что важно, именно на том же возрастном уровне (граница Кунда — Азери) в разрезе ордовика реки Тосны М. А. Сметарсом с соавторами (Smethurst et al., 1998) был также обнаружен маломощный интервал прямой полярности и, таким образом, существование зоны прямой полярности в середине дарривила (лланвирна) как будто бы получило независимое подтверждение.

Однако в обнажениях каньона реки Тосны верхнекундаские и азериские отложения не вскрываются (Dronov et al., 2019). Скорее всего, за отложения «Верхнего чечевичного слоя», который на территории Эстонии отвечает горизонту Азери, авторами работы (Smethurst et al., 1998) были приняты литологически сходные с ними отложения «Нижнего чечевичного слоя», которые как раз вскрываются в долине реки Тосны, но отвечают низам кундаского горизонта, т.е. соответствуют скорее подошве дарривильского яруса, а не его середине. Таким образом, взаимосогла-

сованность скандинавских и российских данных относительно среднедарривильского эпизода прямой полярности оказывается кажущейся, а само существование этого эпизода остается требующим дополнительных доказательств.

Данные, полученные нами по относительно глубоководному разрезу Мишина Гора, позволяют тестировать эту гипотезу. Напомним, что в ордовике Восточно-Европейская платформа находилась в Южном полушарии (Torsvik et al., 2012). Соответственно, ордовикские палеомагнитные направления с отрицательными наклонениями отвечают прямой полярности геомагнитного поля, а палеомагнитные направления с положительными наклонениями отвечают его обратной полярности. На рис. 1 видно, что, несмотря на довольно детальную охарактеризованность интервала разреза, лежащего вблизи границы Кунда — Азери, какие-либо следы намагниченности прямой полярности ордовикского возраста здесь отсутствуют. Первичная намагниченность всех образцов из этого, а также из других интервалов разреза имеет исключительно обратную полярность. Таким образом, данные по мишиногорскому разрезу не подтверждают существование интервала прямой полярности внутри суперхрона Мойеро.

5. Выводы

1. Мишиногорская структура сформировалась в интервале времени ~370–250 млн лет назад.
2. Древняя компонента намагниченности R, определяемая в ниже-среднеордовикских разрезах Северо-Запада России, Эстонии и Скандинавии, успешно проходит тест складки, что подтверждает надежность использования соответствующих палеомагнитных полюсов для палеогеографических и палеотектонических реконструкций с участием Балтики.
3. Полученные магнитостратиграфические данные не подтверждают гипотезу о существовании интервалов прямой полярности внутри ордовикского геомагнитного суперхрона обратной полярности (суперхрон Мойеро).

Благодарности

Авторы выражают свою искреннюю благодарность К. Е. Дегтяреву, А. А. Костерову, И. В. Головановой и К. Н. Данукалову, принявшим активное участие в обсуждении статьи.

Литература

- Асаткин, Б. П. (1938). Гдовские дислокации (Ленинградская область). *Труды Ленинградского геологического треста*. М.; Л. Вып. 14.
- Балашов, З. Г. (1960). К вопросу о природе ордовикской фауны в деревне Мишина Гора. *Вестник ЛГУ. Серия. Геология и география*, 1 (6), 43–47.
- Буслович, А. П., Малаховский, Д. Б., Глазов, Е. А. (2004). Мишиногорская трубка взрыва на южном склоне Балтийского щита. В: А. В. Дронов, под ред., *Ордовикское плато. К 100-летию со дня рождения Б. П. Асаткина*. М.: Воентехиниздат, 56–67.
- Гуревич, Е. Л., Храмов, А. Н., Родионов, В. П., Деккерс, М., Федоров, П. В. (2005). Палеомагнетизм ордовикских и девонских осадочных пород северо-запада Русской платформы: новые данные

- о кинематике Балтики в палеозое и о пермо-триасовом перемагничивании. *Физика Земли*, 7, 48–64.
- Дронов, А. В. (2004). Разрез ордовикских отложений мишиногорского карьера. В: А. В. Дронов, под ред., *Ордовикское плато. К 100-летию со дня рождения Б. П. Асаткина*. М.: Воентехиниздат, 68–85.
- Лаборатория Главного геомагнитного поля и Петромагнетизма. [online] Доступно на: <http://paleomagifz.ru/ru/equipment> [Дата доступа 18.05.2021].
- Лубнина, Н. В., Зайцев, А. В., Павлов, В. Э. (2005). Новые данные о магнито-стратиграфии ранне-го-среднего ордовика на северо-западе русской плиты. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*, 2, 3–11.
- Масайтис, В. Л., Данилин, А. И., Машак, М. С., Райхлин, А. И., Селивановская, Т. В., Шаденков, Е. М. (1980). *Геология астроблем*. Л.: Недра. 50–56.
- Мельникова, Л. М. (2004). Предварительные данные по ордовикским остракодам местонахождения Мишиной горы. В: А. В. Дронов, под ред., *Ордовикское плато. К 100-летию со дня рождения Б. П. Асаткина*. М.: Воентехиниздат, 90–100.
- Мянниль, Р. М. (1966). *История развития Балтийского бассейна в ордовике*. Таллин: Валгус.
- Толмачева, Т. Ю. (2004). Предварительные данные по распределению конодонтов в Мишиногорском разрезе. В: А. В. Дронов, под ред., *Ордовикское плато. К 100-летию со дня рождения Б. П. Асаткина*. М.: Воентехиниздат, 86–93.
- Храмов, А. Н., Иосифиди, А. Г. (2009). Палеомагнетизм осадочных пород нижнего ордовика и кембрия в разрезе правого берега р. Нарва: к построению модели кинематики Балтики в раннем палеозое. *Физика Земли*, 6, 3–19.
- Храмов, А. Н., Гончаров, Г. И., Комиссарова, Р. А., Писаревский, С. А., Погарская, И. А., Ржевский, Ю. С., Родионов, В. П., Слауцитайс, И. П. (1982). *Палеомагнитология*. Л.: Недра.
- Чихачев, С. М., Некрасов, Б. А. (1937). О геологических исследованиях в Гдовском районе летом 1935 г. *Труды советской секции междунар. ассоциации по изучению четвертичного периода*. М.: Изд-во АН СССР, 2, 32–36.
- Ainsaar, L., Tinn, O., Dronov, A., Kipli, E., Radzevičius, S. and Meidla, T. (2020). Stratigraphy and facies differences of the Middle Darrivilian Isotopic Carbon Excursion (MDICE) in Baltoscandia. *Est. J. Earth Sci.*, 69, 214–222.
- Butler, R. F. (1998). *Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes*. [online] Department of Geosciences University of Arizona Tucson, Arizona, available at: <https://websites.pmc.ucsc.edu/~njarboe/pmagsresource/ButlerPaleomagnetismBook.pdf> (Accessed May 18, 2021).
- Claesson, K. C. (1978) Swedish Ordovician limestones: Problems in clarifying their directions of magnetization. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 16, 65–72.
- Dronov, A. V., Tolmacheva, T. Yu. and Iskyul, G. S. (2019). Ordovician of the St. Petersburg Region. *13th International Symposium on the Ordovician System. Guidebook of the Pre-Symposium field trip (July 15–17, 2019)*. St Petersburg: VSEGEI Publishing House.
- Enkin, R. J. (2003). The direction-correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 212, 151–166.
- Grappone, J. M., Chaffee, T., Isozaki, Y., Bauert, H. and Kirschvink, J. L. (2017). Investigating the duration and termination of the Early Paleozoic Moyero reversed polarity Superchron: Middle Ordovician paleomagnetism from Estonia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 485, 673–686.
- McFadden, P. L. and McElhinny, M. W. (1990). Classification of the reversal test in palaeomagnetism. *Geophys. J. Int.*, 103, 725–729. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>
- Pavlov, V. and Gallet, Y. (2005). A third superchron during the Early Paleozoic. Episodes. *Newsmagazine Int. Union Geol. Sci.*, 28, 78–84.
- Plado, J., Preeden, U., Joeleht, A., Pesonen, L. J. and Mertanen, S. (2016). Palaeomagnetism of Middle Ordovician carbonate sequence, Vaivara Sinimäed area, northeast Estonia, Baltica. *Acta Geophys.*, 64, 1391–1411.
- Preeden, U., Mertanen, S., Elminen, T., Plado, J. (2009). Secondary magnetizations in shear and fault zones in southern Finland. *Tectonophysics*, 479, 203–213.
- Smethurst, M. A., Khramov, A. N. and Pisarevsky, S. (1998). Palaeomagnetism of the Lower Ordovician Orthoceras Limestone, St Petersburg, and a revised drift history for Baltica in the early Palaeozoic. *Geophys. J. Int.*, 133, 44–56.

- Tauxe, L. (2010). *Essentials of paleomagnetism*. Univ of California Press.
- Torsvik, T. H. and Trench, A. (1991). Ordovician magnetostratigraphy: Llanvirn–Caradoc limestones of the Baltic platform. *Geophys. J. Int.*, 107, 171–184.
- Torsvik, T. H., Trench, A., Lohmann, K. C. and Dunn, S. (1995). Lower Ordovician reversal asymmetry: An artifact of remagnetization or nondipole field disturbance? *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 100, 17885–17898.
- Torsvik, T. H. and Rehnstrom, E. F. (2003). The Tornquist Sea and Baltica — Avalonia docking. *Tectonophysics*, 362, 67–82.
- Torsvik, T. H., Van der Voo, R., Preeden, U., Mac Niocaill, C., Steinberger, B., Doubrovine, P. V., van Hinsbergen, D. J. J., Domeier, M., Gaina, C., Tohver, E., Meert, J. G., McCausland, P. J. A. and Cocks, L. R. M. (2012). Phanerozoic Polar Wander, Palaeogeography and Dynamics. *Earth-Science Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>

Статья поступила в редакцию 26 июня 2021 г.
Статья рекомендована к печати 6 декабря 2021 г.

Контактная информация:

Павлов Владимир Эммануилович — pavlov.ifz@gmail.com
Пасенко Александр Михайлович — Pasenkoal@ya.ru
Дронов Андрей Викторович — avdronov@gmail.com
Чернышов Сергей Павлович — mr.serge113@yandex.ru

Paleomagnetism of the Ordovician section of the Mishina Gora (Pskov oblast): a record of the ancient geomagnetic field and restrictions on the age of the Mishinogorsk explosive structure*

V. E. Pavlov^{1,2}, A. M. Pasenko¹, A. V. Dronov^{2,3}, S. P. Chernyshov¹

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Science, 10, Bolshaya Gruzinskaya ul., Moscow, 123242, Russian Federation

² Kazan Federal University, 18, ul. Kremlyovskaya, Kazan, 420008, Russian Federation

³ Geological Institute, Russian Academy of Science, 7, Pyzhevsky per., Moscow, 119017, Russian Federation

For citation: Pavlov, V. E., Pasenko, A. M., Dronov, A. V., Chernyshov, S. P. (2022). Paleomagnetism of the Ordovician section of the Mishina Gora (Pskov oblast): a record of the ancient geomagnetic field and restrictions on the age of the Mishinogorsk explosive structure. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 67 (1), 4–19. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.101>

Paleomagnetic studies of the Ordovician rocks of the Mishina Gora explosive structure (Gdovsky district, Pskov region) have been carried out. Based on the results of thermal magnetic cleaning, two stable magnetization components S and P have been identified. These components have similar unblocking temperature ranges (~200–600°C), but their mean directions are statistically different the difference of their mean directions are statistically significant. Refional fold test indicates the postfolding age of the component S and prefolding age of the component P. Prefolding age of the latter is supported by the positive

* This work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 20-17-00198 (sampling, analysis and interpretation of data) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under contract No. 14.Y26.31.0029 within the framework of the implementation of the Decree of the Government of the Russian Federation No. 220 (preparation of the article).

result of the local fold-test which has been carried out in the scale of the studied section. Comparison of the paleomagnetic pole calculated from the S component with the Apparent Polar Wander Path for the East European Platform definitely indicates the Late Permian–Early Triassic age of this component, which, in combination with the available geological observations, determines the time range of the formation of the Mishina Gora structure as ~370–250 million years ago. The ancient component of the magnetization P has the same direction as the components, which have been identified earlier in a number of coeval sections of the North-West of Russia, Estonia, and Scandinavia and which have been considered to be primary. The corresponding paleomagnetic poles are widely used in Paleozoic geodynamic and tectonic paleoreconstructions with the participation of the Baltic paleocontinent. A positive fold test result for the P component validates the use of these poles for paleoreconstructions. For the stratigraphic interval, which includes the upper Floian, Dapinian, and lower 2/3 of the Darrivilian stages, a magnetostratigraphic section has been constructed containing a single magnetozone corresponding to the reverse polarity of the geomagnetic field. Thus, the magnetostratigraphic data do not support the hypothesis of the existence of intervals of normal polarity within the Ordovician geomagnetic superchron of reverse polarity (Moyero superchron).

Keywords: Ordovician superchron, paleomagnetism, Mishina Gora, Moyero superchron, Ordovician.

References

- Ainsaar, L., Tinn, O., Dronov, A., Kiipli, E., Radzevičius, S. and Meidla, T. (2020). Stratigraphy and facies differences of the Middle Darriwilian Isotopic Carbon Excursion (MDICE) in Baltoscandia. *Est. J. Earth Sci.*, 69, 214–222.
- Asatkin, B. P. (1938). Gdovsky deployment (Leningrad oblast). *Proceedings of the Leningrad Geological Trust*. M.; L., 14. (In Russian)
- Balashov, Z. G. (1960). On the nature of the Ordovician fauna in the Mishina Gora village. *Vestnik LGU, seriia geol. i geogr.*, 1 (6), 43–47. (In Russian)
- Buslovich, A. P., Malakhovskii, D. B. and Glazov, E. A. (2004). Mishinogorsk explosion tube on the southern slope of the Baltic shield, in Dronov, A. V. (ed.), *Ordovician plateau. To the 100th anniversary of the birth of B. P. Asatkin*. Moscow: Voentekhnizdat Publ., 56–67. (In Russian)
- Butler, R. F. (1998). *Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes*. [online] Department of Geosciences University of Arizona Tucson, Arizona. Available at: <https://websites.pmc.ucsc.edu/~njarboe/pmagresource/ButlerPaleomagnetismBook.pdf> [Accessed May 18, 2021].
- Chikhachev, S. M. and Nekrasov, B. A. (1937). On geological research in the Gdov region in the summer of 1935. *Proceedings of the Sov. section int. associations for the study of the Quaternary*. Moscow: AN SSSR Publ. 2, 32–36. (In Russian)
- Claesson, K. C. (1978). Swedish Ordovician limestones: Problems in clarifying their directions of magnetization. *Phys. Earth Planet. Inter.* 16, 65–72.
- Dronov, A. V. (2004). Section of the Ordovician deposits of the Misinogorsk quarry, in Dronov, A. V. (ed.), *Ordovician plateau. To the 100th anniversary of the birth of B. P. Asatkin*. Moscow: Voentekhnizdat Publ., 68–85. (In Russian)
- Dronov, A. V., Tolmacheva T. Yu. and Iskyul, G. S. (2019). Ordovician of the St Petersburg Region. *13th International Symposium on the Ordovician System. Guidebook of the Pre-Symposium field trip (July 15–17, 2019)*. St Petersburg, VSEGEI Publishing House.
- Enkin, R. J. (2003). The direction–correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies. *Earth Planet. Sci. Lett.* 212, 151–166.
- Grappone, J. M., Chaffee, T., Isozaki, Y., Bauert, H. and Kirschvink, J. L. (2017). Investigating the duration and termination of the Early Paleozoic Moyero reversed polarity Superchron: Middle Ordovician paleomagnetism from Estonia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 485, 673–686.
- Gurevich, E. L., Khramov, A. N., Rodionov, V. P., Dekkers, M. and Fedorov, P. V. (2005). Paleomagnetism of Ordovician and Devonian sedimentary rocks in the northwest of the Russian platform: new con-

- straints on the Baltica kinematics in the Paleozoic and the remagnetization in the permian-triassic. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 41 (7), 555–570.
- Khramov, A. N. and Iosifidi, A. G., (2009). Paleomagnetism of the lower Ordovician and Cambrian sedimentary rocks in the section of the Narva river right bank: for the construction of the Baltic kinematic model in the early Paleozoic. *Izvestiya. Physics of the solid Earth*, 45 (6), 465–481.
- Khramov, A. N. N., Goncharov, G. I., Komissarova, R. A., Pisarevskii, S. A., Pogarskaia, I. A., Rzhnevskii, Iu. S., Rodionov, V. P. and Slautsitsai, I. P. (1982). *Paleomagnetology*. Leningrad: Nedra Publ. (In Russian) Laboratory of the Main Geomagnetic Field and Petromagnetism [website]. Available at: <http://paleomag-iz.ru/ru/equipment> [Accessed May 18, 2021].
- Lubnina, N. V., Zaitsev, A. V. and Pavlov, V. E. (2005). New Data on Magneto-Stratigraphy of the Early-Middle Ordovician in the North-West of the Russian Plate. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriiia 4. Geologiya*, 2, 3–11. (In Russian)
- Masaitis, V. L., Danilin, A. I., Mashchak, M. S., Raichlin, A. I., Selivanovskaya, T. V. and Shadenkov, E. M., (1980). *Astrobleme geology*. Leningrad: Nedra Publ. 50–56. (In Russian)
- McFadden, P. L. and McElhinny, M. W. (1990). Classification of the reversal test in palaeomagnetism. *Geophys. J. Int.*, 103, 725–729. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>
- Meľnikova, L. M. (2004) Preliminary data on the Ordovician ostracods of the Mishina Gora locality, in Dronov, A. V. (ed.), *Ordovician plateau. To the 100th anniversary of the birth of B. P. Asatkin*. Moscow: Voentekhnizdat Publ., 68–85. (In Russian)
- Miannil, R. M. (1966) *The history of the development of the Baltic basin in the Ordovician*. Tallin: Valgus Publ. (In Russian)
- Pavlov, V. and Gallet, Y. (2005). A third superchron during the Early Paleozoic. Episodes. *Newsmagazine Int. Union Geol. Sci.* 28, 78–84.
- Plado, J., Preeden, U., Joeleht, A., Pesonen, L. J. and Mertanen, S. (2016). Palaeomagnetism of Middle Ordovician carbonate sequence, Vaivara Sinimäed area, northeast Estonia, Baltica. *Acta Geophys.*, 64, 1391–1411.
- Preeden, U., Mertanen, S., Elminen, T. and Plado, J. (2009). Secondary magnetizations in shear and fault zones in southern Finland. *Tectonophysics*, 479, 203–213.
- Smethurst, M. A., Khramov, A. N. and Pisarevsky, S. (1998). Palaeomagnetism of the Lower Ordovician Orthoceras Limestone, St Petersburg, and a revised drift history for Baltica in the early Palaeozoic. *Geophys. J. Int.*, 133, 44–56.
- Tauxe, L., (2010). *Essentials of paleomagnetism*. Univ. of California Press.
- Tolmacheva, T. Iu. (2004). Preliminary data on the distribution of conodonts in the Mishinogorsk section, in Dronov, A. V. (ed.), *Ordovician plateau. To the 100th anniversary of the birth of B. P. Asatkin*. Moscow: Voentekhnizdat Publ., 68–85. (In Russian)
- Torsvik, T. H. and Rehnstrom, E. F. (2003). The Tornquist Sea and Baltica — Avalonia docking. *Tectonophysics*, 362, 67–82.
- Torsvik, T. H. and Trench, A. (1991). Ordovician magnetostratigraphy: Llanvirn–Caradoc limestones of the Baltic platform. *Geophys. J. Int.* 107, 171–184.
- Torsvik, T. H., Trench, A., Lohmann, K. C. and Dunn, S. (1995). Lower Ordovician reversal asymmetry: An artifact of remagnetization or nondipole field disturbance? *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 100, 17885–17898.
- Torsvik, T. H., Van der Voo, R., Preeden, U., Mac Niocaill, C., Steinberger, B., Doubrovine, P. V., van Hinsbergen, D. J. J., Domeier, M., Gaina, C., Tõhver, E., Meert, J. G., McCausland, P. J. A. and Cocks, L. R. M. (2012). Phanerozoic Polar Wander, Palaeogeography and Dynamics. *Earth-Science Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>

Received: June 26, 2021
Accepted: December 6, 2021

Contact information:

Vladimir E. Pavlov — pavlov.ifz@gmail.com
Aleksandr M. Pasenko — Pasenkoal@ya.ru
Andrey V. Dronov — avdronov@gmail.com
Sergey P. Chernyshov — mr.serge113@yandex.ru