

УДК 551.83

ПЕТРОМАГНИТНЫЙ ПОРТРЕТ ДЕВОНСКОГО РАЗРЕЗА О. СТОЛБ (ДЕЛЬТА р. ЛЕНЫ)

© 2021 г. Д. В. Метелкин^{1,2,*}, А. И. Чернова^{2,1}, академик РАН В. А. Верниковский^{2,1},
Н. Э. Михальцов^{2,1}, В. В. Абашев^{2,1}

Поступило 07.07.2021 г.
После доработки 23.07.2021 г.
Принято к публикации 28.07.2021 г.

Позднедевонский разрез небольшого острова Столб в дельте реки Лены знаменит тем, что в его нижней части зафиксировано массовое исчезновение значительного числа таксонов, которое может быть отражением глобальной биотической катастрофы Upper Kellwasser. Нашей задачей было создание петромагнитного эталона для названной территории и поиск “магнитных следов” предполагаемого биотического события. Полученный в итоге петромагнитный “портрет” свидетельствует о стабильном режиме осадконакопления и исключает влияние региональных тектонических факторов, которые могли бы способствовать резкому изменению условий среды обитания в бассейне. В то же время палеомагнитная запись не соответствует ожидаемой для этих координат Сибири и указывает на вероятный аномальный характер геомагнитного поля, на фоне которого получило распространение массовое вымирание Upper Kellwasser.

Ключевые слова: петромагнетизм, палеомагнетизм, девон, Upper Kellwasser, Арктика, дельта Лены

DOI: 10.31857/S2686739721110098

Небольшой по размерам остров Столб расположен на входе в разветвленную сеть дельты реки Лены, где она разделяется на три главные протоки: Оленекскую, Бол. Трофимовскую и Быковскую, примерно в 150 км от места впадения в море Лаптевых (рис. 1). Этот скальный выступ высотой 114 м, расположенный практически в центре реки, рассматривается как останец Хараулахского хребта, маркирующего фронтальную зону надвиговой структуры Верхоянского складчатого пояса. Геологический разрез о. Столб общей мощностью около 200 м сложен выдержанной по составу и строению толщей карбонатно-силикатных обломочных пород, преимущественно тонкопесчаной и крупноалевритовой размерности с редкими маломощными прослоями интракластовых гравелитобрекчий [1]. Детальные литолого-седиментологические и биостратиграфические исследования позволили расчленить разрез на

37 пачек мощностью от 0.6 до 16 м (для большинства пачек мощность составляет первые метры), обосновать франско-фаменский возраст и относительно глубоководный тип осадконакопления в пределах дистальной части шельфа [1]. При этом в основании разреза, внутри пачки 3 обнаружен пакет темно-серых и черных углеродистоглинистых пород, который по литолого-стратиграфическим признакам может быть сопоставлен с одним из самых крупных в фанерозое биотических кризисов – Upper Kellwasser. Ареал распространения его следов, возможные глобальные и региональные причины дискутируются [2]. В качестве главной версии называется изменение климата, вызванное бурным развитием континентальной растительности и, соответственно, перераспределением CO₂, что в итоге привело к появлению аноксических условий, которые зафиксированы, главным образом, в шельфовых бассейнах Северной Америки, Западной Европы, Южного Китая, Гондванской группы континентов, находившихся в южных субтропиках и вблизи экватора [2]. Сибирская континентальная окраина согласно палеогеографическим построениям не попадает в эту полосу [2–4]. Несколько другой сценарий резкого изменения среды обитания на фоне постепенных климатических преобразова-

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: metelkindv@ipgg.sbras.ru



Рис. 1. Вид на о. Столб с западной стороны.

ний включает региональный тектонический фактор, прежде всего, смену характера континентального сноса в бассейны осадконакопления. Проверить эту гипотезу можно на основе изучения вариаций скалярных петромагнитных параметров. Наиболее чутким инструментом являются магнитная восприимчивость (k), величина естественной остаточной намагниченности (NRM), фактор Кенигсбергера (Q_n), которые в отличие от векторных палеомагнитных характеристик (включая смену магнитной полярности) не зависят от режима генерации геомагнитного поля, а связаны с концентрацией Fe-содержащих частиц. В частности, в ряде изученных разрезов Европы, Северной Америки, Африки именно петромагнитная, а не магнитополярная запись позволяет проводить детальные, в том числе, межрегиональные корреляции [5].

С целью создания петромагнитного эталона рубежа франа-фамена для территории Северного Хараулаха и оценки перспективности его использования для решения вопросов стратиграфии района, а также поиска “магнитных следов” биотической катастрофы проведен анализ вариаций основных петромагнитных характеристик в разрезе о. Столб. Стандартный набор петромагнитных параметров мы дополнили изучением векторных палеомагнитных характеристик и анизотропии магнитной восприимчивости (AMS), которая в осадочных породах служит не только для оценки сохранности магнитной текстуры осадка, но и может помочь в определении направления сноса магнитного материала [6, 7].

Нам удалось охарактеризовать 30 пачек разреза (рис. 2). Каждое определение на представленных графиках является средней величиной для соответствующего литологического уровня и рассчитано не менее чем по 9 образцам. Вариации по разрезу величин NRM ($\sim 10^{-3}$ А/м) и k ($\sim 10^{-5}$ ед. СИ) незначительные (рис. 2). Исключение представляет пачка 26, расположенная в разрезе значительно выше события Upper Kellwasser. Здесь установлено резкое (на порядок) кратковременное изменение NRM и k . Оба указанных параметра в основном меняются синхронно. Об этом свидетельствуют слабые вариации величины Q_n , которая представляет отношение NRM и k . Величина Q_n по всему разрезу в среднем составляет ~ 0.5 . Максимальные значения Q_n (~ 1.5 и более) отвечают пачкам 5 и 26 (рис. 2).

Вариации Q_n косвенно отражают соотношение ориентационной (детритной) и химической намагниченности в образцах. При ориентационной намагниченности, связанной в большей степени с аллотигенным магнетитом, как наиболее сильным и частым ферромагнетиком в осадках, наблюдается положительная корреляция k и NRM. Поэтому мы предполагаем, что пик концентрационно-зависимых параметров для пород пачки 26 прежде всего соответствует кратковременному увеличению доли аллотигенного Fe-содержащего материала, который не связан с событиями глобального характера, а имеет узкорегionalные причины, например, обособление богатой магнетитом кислой вулканокластики в источнике сноса [1].

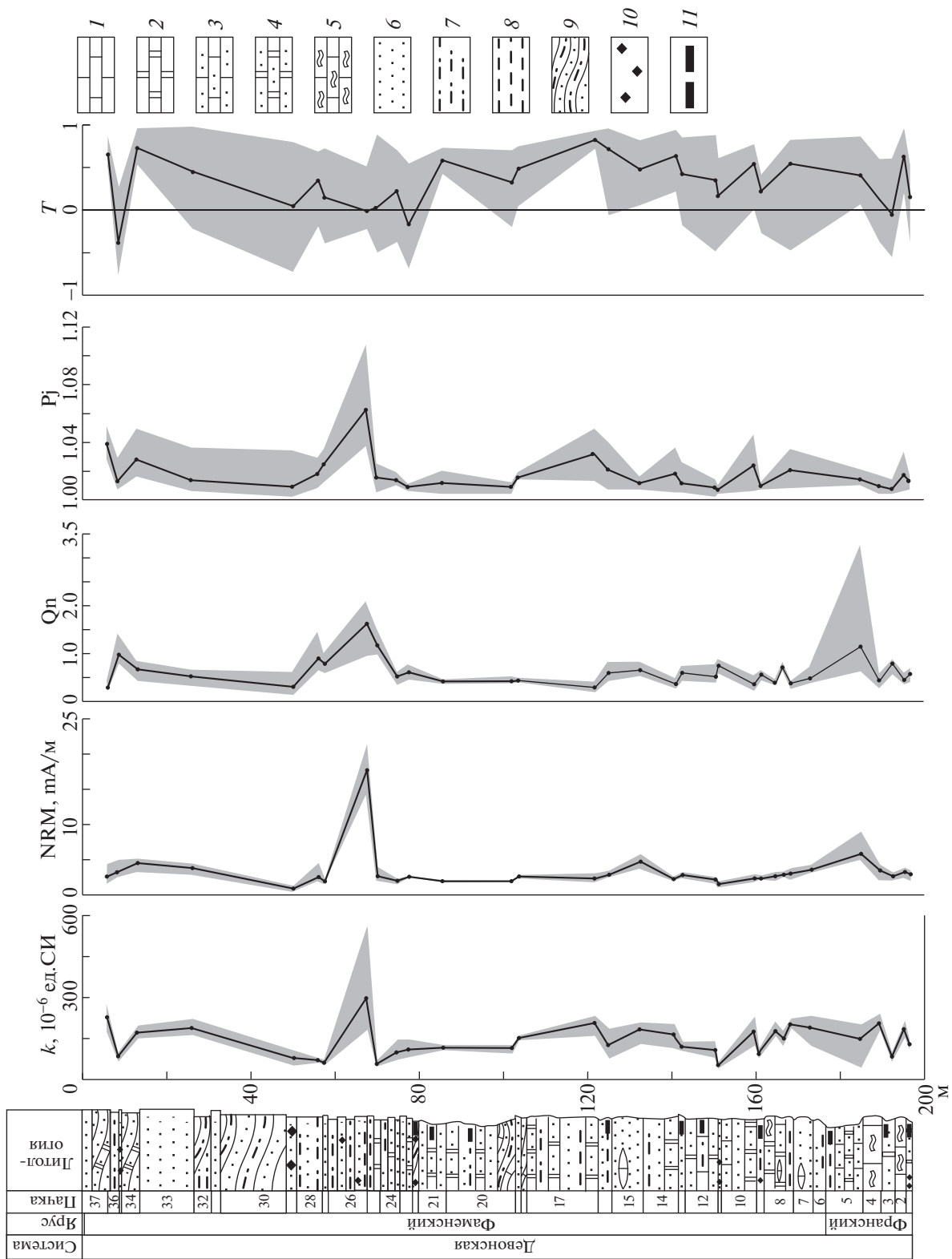


Рис. 2. Вариации петромагнитных параметров и характеристик AMS в изученном разрезе. Литолого-стратиграфическая колонка по [1] с упрощениями. Серым цветом на графиках показан диапазон вариаций магнитных характеристик в точках опробования. 1 – известняки; 2 – доломиты; 3 – калькарениты; 4 – долларениты; 5 – конгломератовидные известняки; 6 – песчаники; 7 – алевролиты; 8 – аргиллиты, глинистые породы; 9 – оползневые брекчии; 10 – наличие сульфидов в слоях; 11 – горизонты с углистым веществом. 0-й метр разреза соответствует кровле 37-й пачки в наивысшей точке острова.

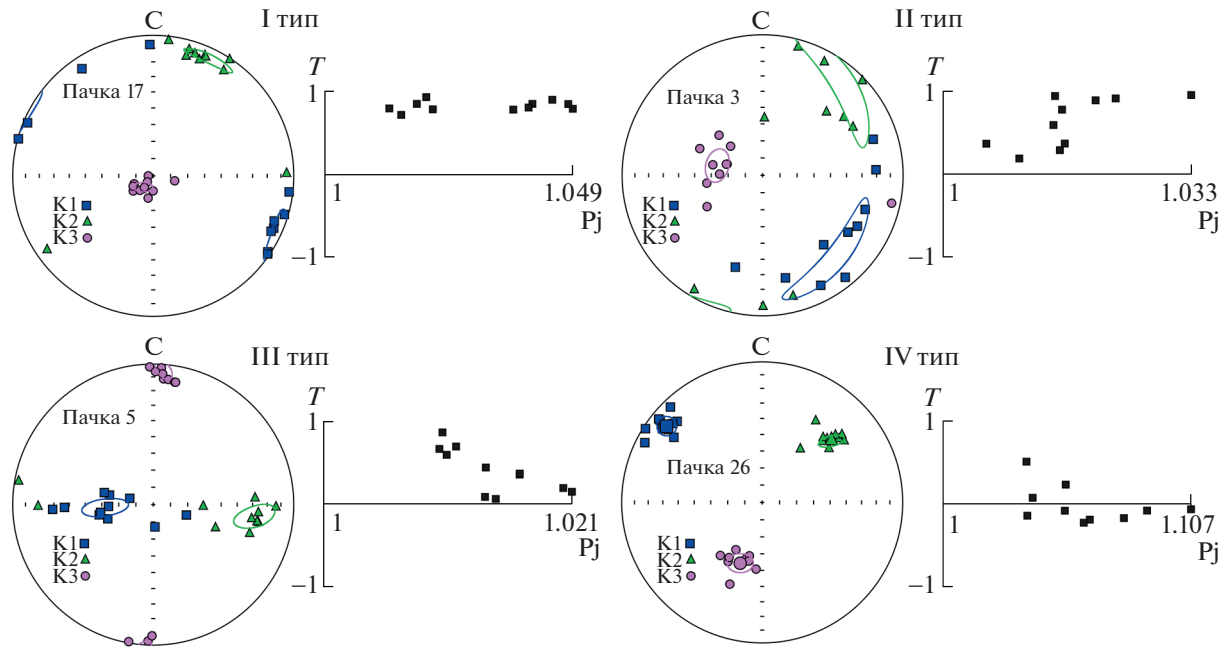


Рис. 3. Типичные магнитные текстуры отложений о. Столб. Стереограммы отображают распределения осей эллипсоида AMS: K1 – максимальной, K2 – средней, K3 – минимальной. На графиках изображена зависимость фактора формы T от степени анизотропии Pj.

Повышенные Qn при отрицательной корреляции значений k и NRM, как в пачке 5 и некоторых других, может говорить о большем вкладе химической намагниченности, обусловленной присутствием аутигенных магнитных минералов, например, грейгита и пирротина. Их образование в морских мелко- и тонкозернистых осадках со значительным количеством органики, илистой фракции, отмечающей восстановительные условия окружающей среды, очень характерно [8]. И хотя стабильность этих минералов дискуссионная, тем не менее они сохраняются в карбонатно-глинистых породах даже эдиакарского возраста [9]. В разрезе о. Столб на фоне карбонатно-кlastических (в том числе и обломочных доломитов) отмечаются битумные прослойки, рассеянное углеродистое вещество и примеси глинистого материала [1], что свидетельствует об условиях, подходящих для образования указанных сульфидов железа и дефицита кислорода, способствующего формированию аноксийных условий в бассейне. Тем не менее пачка 3 на общем фоне не выделяется (рис. 2), и четких литологических критериев или последовательности смены слоев, в которых бы фиксировалось закономерное изменение соотношения аллотигенных и аутигенных магнитных частиц, обнаружить не удалось. Главным фактором, контролирующим этот процесс, вероятно, была скорость осадконакопления, которая постоянно варьировала. Даже при ее незначи-

тельном росте заметно уменьшается концентрация органического вещества и соответственно увеличивается доля детрита. Периодам относительно спокойного осадконакопления соответствует увеличение концентрации углеродистого материала, органики и соответственно более активное замещение привнесенного магнетита сульфидами железа, в итоге вклад аутигенных частиц растет.

Для анализа магнитной текстуры пород, определяемой по результатам исследования AMS, используется параметр Pj, характеризующий общую степень анизотропии и T, описывающий форму эллипсоида AMS [7]. Они рассчитываются по формулам: $P_j = \exp\{\sqrt{2 \cdot (n_1 - n)^2 + (n_2 - n)^2 + (n_3 - n)^2}\}$ и $T = (2 \cdot n_2 - n_1 - n_3) / (n_1 - n_3)$, где n1, n2, n3 – натуральные логарифмы нормированных на общую величину магнитной восприимчивости значений K1, K2, K3, соответствующих главным осям эллипсоида ($K_1 > K_2 > K_3$), а $n = (n_1 \cdot n_2 \cdot n_3)^{1/3}$. Значение $P_j = 1$ соответствует магнитно-изотропной среде и увеличивается по мере роста степени анизотропии, как правило, вследствие стрессового воздействия. Параметр формы T > 0 указывает на сплюснутый эллипсоид AMS, T < 0 при его вытянутой форме. Зафиксированные в изученном разрезе Pj в среднем 1–1.06, а T преимущественно положительный (рис. 2), что, в целом, соответствует слоистым осадкам, которые не подверглись стрессовым деформаци-

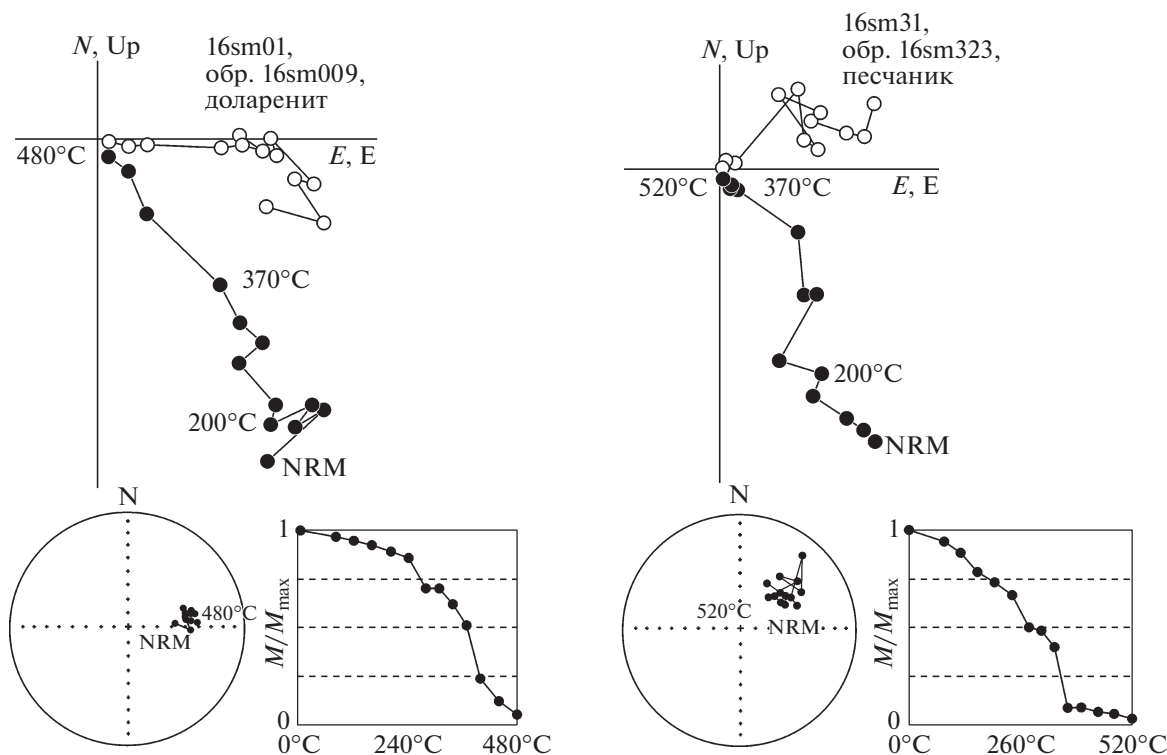


Рис. 4. Характерные ортогональные диаграммы, стереограммы и соответствующие графики зависимости величины намагниченности от температуры по результатам температурного размагничивания. На ортогональных диаграммах темные точки отвечают проекции вектора на горизонтальную плоскость, светлые – на вертикальную плоскость; на стереограммах – темные точки соответствуют проекции вектора на нижнюю полусферу, светлые – на верхнюю полусферу; система координат стратиграфическая.

ям. Обнаруженные магнитные текстуры мы группируем в 4 типа (рис. 3) и связываем их с различными условиями седиментации, диагенеза и/или различиями в составе магнитных минералов [7].

Первый, наиболее распространенный тип отвечает первичной магнитной текстуре, когда максимальная ось K1 ориентирована вдоль слоистости, а минимальная ось K3 перпендикулярна слоистости (рис. 3а).

Для пачек с явными структурно-текстурными признаками быстрого перемешивания осадка вследствие подводного оползания (пачки 2, 3, 20 и др.), характерен второй тип магнитной текстуры, когда эллипсоид AMS ориентирован косо по отношению к измеренной слоистости (рис. 3б). При этом максимальные оси также как и в первом типе всегда направлены на восток, юго-восток (в среднем по всем пачкам $D = 93.8^\circ$, $I = 8.1^\circ$). Согласно теоретическим данным, это может отвечать преобладающему направлению палеотранспорта или ориентировке палеосклона [6]. Соответственно кластический материал в позднедевонский бассейн, в основном, поступал с палеоконтинента [10], а не с противоположной стороны, где по некоторым моделям предполагается гипотетическая суша [11].

Преимущественно в верхней части разреза встречается третий тип магнитной текстуры, когда средняя и вертикальная оси расположены субвертикально или наклонно (рис. 3в), при этом сохраняется сплюснутая форма эллипсоида.

Наконец, четвертый тип магнитной текстуры зафиксирован лишь в нескольких пачках, отличается нейтральным или вытянутым эллипсоидом AMS с T от 0 до -1 и наиболее высокими значениями степени анизотропии – до 10% (рис. 3г). Возникновение двух последних типов текстур может быть обусловлено подводно-оползновыми процессами, значительной биотурбацией, либо наличием аутигенных магнитных сульфидов, для которых характерно преобладание магнетокристаллической анизотропии над анизотропией формы [7, 12].

Результаты температурной чистки и компонентного анализа NRM свидетельствуют, что наиболее стабильной компонентой является характеристическая, температура деблокирования которой близка температуре Кюри магнетита. Как правило, основная часть (до 90%) NRM разрушается при нагреве от 520 до 570°C (рис. 4). Мы полагаем, что эта компонента имеет ориентационную природу, т.е. образовалась за счет ори-

ентировки частиц магнитного детрита по направлению геомагнитного поля во время осадконакопления.

Во многих образцах падение величины NRM также отмечается в диапазоне температур 300–350°C, что подтверждает предположение о наличии сульфидов железа (пирротина и, возможно, грейгита), имеющих обычно химический тип намагничивания. При этом направление данной компоненты статистически не отличается от характеристического. Учитывая сведения о сохранности осадочной магнитной текстуры, можно предполагать, что возникновение химической намагниченности обусловлено преобразованием детритового магнетита и происходило вскоре после его попадания в осадок, до или во время диагенетических преобразований, литификации и окончательной фиксации намагниченности, т.е. по сути не отличается от первичной. Однако палеомагнитный полюс ($Plat = 35.5^\circ$, $Plong = 221.2^\circ$, $A95 = 6.3^\circ$), рассчитанный по совокупности характеристических направлений в 21 пачке разреза ($n = 206$, $Ds = 73.7^\circ$, $Is = 51.6^\circ$, $K = 204.8$, $\alpha95 = 2.1^\circ$), заметно отличается от ожидаемого для позднего девона Сибири [3]. Кроме того, все палеомагнитные направления в изученном разрезе о. Столб имеют исключительно положительное наклонение, тогда как в мировых аналогах франско-фаменский интервал отличается частой сменной полярности. Эти факты требуют дополнительного исследования, однако современные данные все больше подтверждают предположение о крайней нестабильности, аномально сложной конфигурации геомагнитного поля в девоне, вследствие резкого снижения величины его дипольного момента [13–15]. И хотя причины коррелятивной связи между событиями в магнитосфере и биосфере до конца неясны, само ее наличие отрицать сложно [16]. Так, признаки заметного снижения величины палеонапряженности отмечаются на переломном в эволюции жизни рубеже палеозоя–мезозоя [17], на других эволюционных границах, отвечающих моментам геодинамических перестроек [16].

Таким образом, петромагнитный “портрет” девонского разреза о. Столб исключает влияние региональных тектонических факторов, которые могли бы обеспечить создание аноксических условий в позднедевонском осадочном бассейне Сибирской окраины. Вариации петромагнитных характеристик незначительные и определяются, главным образом, соотношением аллотигенных и аутигенных магнитных минералов, которое контролировалось незначительными колебаниями объема поступающей терригенной примеси и разной степенью диагенетических преобразований в преобладающей восстановительной среде. Соответственно, к массовому вымиранию организмов определенно привели глобальные изме-

нения, обеспечившие создание такой среды. При этом полученные векторные палеомагнитные характеристики указывают на вероятный аномальный характер геомагнитного поля во время формирования изученного разреза в девоне, что может быть отражением глобальной геодинамической перестройки, которая затронула не только магнитосферу, но и получило распространение в биосфере, в том числе, сопровождало массовое вымирание Upper Kellwasser.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке РФФ проекты 19-17-00091 и 21-17-00052.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Язиков А.Ю., Изох Н.Г., Сараев С.В. и др. // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1013–1027.
2. Carmichael S.K., Waters J.A., Konigshof P., et al. // Global and Planetary Change. 2019. V. 183. 102984. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.102984>
3. Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю. // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 7. С. 883–899.
4. Golonka J. // Global and Planetary Change. 2020. V. 186. 103129. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103129>
5. Crick R.E., Ellwood B.B., Feist R., et al. // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2002. V. 181. P. 67–90.
6. Baas J.H., Hailwood E.A., McCaffrey W.D., et al. // Earth Science Reviews. 2007. V. 82. P. 101–142.
7. Tarling D.H., Hrouda F. The Magnetic Anisotropy of Rocks. London: Chapman & Hall, 1993. 217 p.
8. Большаков В.А., Долотов А.В. // Физика Земли. 2012. № 6. С. 56–73.
9. Dong J., Zhang S., Jiang G., Li H., Gao R. // Precambrian Research. 2015. V. 225. P. 77–85.
10. Прокопьев А.В., Ершова В.Б., Миллер Э.Л., Худольей А.К. // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 10. С. 1530–1542.
11. Сенников Н.В., Хабибулина Р.А., Гонта Т.В., Обут О.Т. // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 12. С. 1692–1715.
12. Aubourg C., Robion P. // Geophysical Journal International. 2002. V. 151. P. 729–737.
13. Бураков К.С., Диденко А.Н., Печерский Д.М. // Изв. АН СССР. Сер. физика Земли. 1984. № 8. С. 45–59.
14. Shcherbakova V.V., Biggin A.J., Veselovskiy R., et al. // Geophysical Journal International. 2017. V. 209. P. 1265–1286.
15. Шаццло А.В., Павлов В.Э. // Физика Земли. 2019. № 3. С. 97–116.
16. Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Василевский А.Н. // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 1. С. 10–30.
17. Eliseev A.A., Shcherbakova V.V., Metelkin D.V., et al. // Russian Geology and Geophysics. 2021. <https://doi.org/10.2113/RGG20204330>

THE ROCK MAGNETIC PORTRAIT OF THE DEVONIAN SECTION OF STOLB ISLAND (LENA RIVER DELTA)

**D. V. Metelkin^{a,b,#}, A. I. Chernova^{b,a}, Academician of the RAS V. A. Vernikovskiy^{b,a},
N. E. Mikhaltsov^{b,a}, and V. V. Abashev^{b,a}**

^a*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Novosibirsk, Russian Federation*

^b*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: metelkindv@ipgg.sbras.ru*

The Late Devonian section of the small Stolb Island in the Lena River delta is famous because of the mass disappearance of a considerable number of taxa in its lower part, which may be a reflection of the Upper Kellwasser global biotic catastrophe. Our task was to create a rock magnetic reference for this section and search for “magnetic traces” of the inferred biotic event. The resulting rock magnetic “portrait” indicates a stable sedimentation mode and excludes the influence of regional tectonic factors that could contribute to an abrupt change in the habitat conditions in the basin. At the same time, the paleomagnetic record does not correspond to the expected one for these coordinates of Siberia and points to the probable anomalous nature of the geomagnetic field, against which the Upper Kellwasser mass extinction took place.

Keywords: rock magnetism, paleomagnetism, Devonian, Upper Kellwasser, Arctic, Lena Delta