

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*



**Меренкова Софья Ивановна**  
**КЕМБРИЙСКИЙ ПАЛЕОБАССЕЙН ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ:  
ГЕОХИМИЧЕСКАЯ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА**

1.6.1 – Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре региональной геологии и истории Земли геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель:** *Габдуллин Руслан Рустемович, доктор геолого-минералогических наук, доцент.*
- Официальные оппоненты:** *Летникова Елена Феликсовна, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук», главный научный сотрудник.*
- Дронов Андрей Викторович, доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Геологический институт Российской академии наук» (ГИН РАН), главный научный сотрудник.*
- Чехович Петр Андреевич, доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Сектор минерагении и истории Земли (Научно-учебный Музей Землеведения МГУ им. М.В. Ломоносова), заведующий сектором.*

Защита диссертации состоится 26 апреля 2024 года в 14:30 на заседании диссертационного совета МГУ.016.7 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: [nvbadulina@mail.ru](mailto:nvbadulina@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27), на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/2929>.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета МГУ.016.7,  
кандидат геолого-минералогических наук



Ю.А. Гатовский

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.** Восстановление глобальной океанической циркуляции, гидрохимических особенностей водных масс, геохимических круговоротов, биосферных событий и связь этих процессов с климатическими изменениями является важной задачей современной геологии. В историческом контексте кембрия Сибирской платформы наиболее полно эти вопросы можно раскрыть через изучение отложений разных палеогеографических обстановок и временных срезов. Особенно перспективными для изучения в этом отношении становятся черносланцевые формации, так как их формирование обусловлено циркуляционной и биологической активностью, а также химическим составом вод. К черным сланцам принадлежат породы иниканской свиты нижнего и среднего кембрия, отложения которой развиты на юго-востоке Сибирской платформы, входящей в куонамскую битуминозную карбонатно-сланцевую формацию. Реконструкция условий формирования иниканской свиты тесно связана с прогнозом ее потенциала в качестве источника полезных ископаемых – углеводородов и полиметаллической минерализации (Гурари и др., 1984; Евтушенко, 1969; Кембрий ..., 1972; Конторович, 1976; Конторович и др., 1999). Помимо информации о круговороте металлов, изучение таких отложений важно для понимания изменений содержания свободного кислорода и углекислого газа в атмосфере, эволюции океана и биосферных перестроек.

Реконструкции условий формирования отложений лагун, себх, приливных отмелей и других переходных зон между сушей и морским бассейном, представляет собой одну из самых сложных проблем в исследовании палеозойских и более ранних отложений. Несмотря на активное изучение терригенно-карбонатных и карбонатно-соленосных отложений внутренних районов Сибирской платформы, формировавшихся в прибрежно-мелководных и субаэральных условиях (например, (Кузнецов и др., 2000; Бутова и др., 2017; Кузнецов, Журавлева, 2019; Плюснин, 2019; Мотова и др., 2021)), эти разрезы все еще остаются недостаточно изученными как из-за трудностей с датировкой отложений, так и из-за большого своеобразия фаций, не имеющих явных современных аналогов. Данное исследование призвано выявить особенности среднекембрийских отложений внутренних районов Сибирской платформы – эвенкийской свиты, сформировавшихся в субаквальных и субаэральных обстановках. Породы верхоленской серии среднего-верхнего кембрия формировались в ограниченном внутреннем бассейне и не менее перспективны с точки зрения изучения климатических флуктуаций, влияющих на седиментогенез в переходных прибрежно-мелководных зонах.

**Цель и задачи.** Цель диссертационной работы: уточнение палеогеографических условий формирования отдельных кембрийских отложений Сибирской платформы (Алдано-Майская синеклиза, Байкитская антеклиза, Непско-Ботуобинская антеклиза и Предпатомский прогиб).

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Реконструировать гидрохимические условия, особенности стратификации водной толщи в восточной части морского палеобассейна Сибирской платформы, создать концептуальную модель окислительно-восстановительной зональности для данного участка палеобассейна с помощью геохимических исследований пород иниканской свиты из береговых обнажений р. Юдома.

2. Уточнить условия формирования эвенкийской свиты на основе литолого-фациальных реконструкций и геохимических данных соответствующих отложений разреза р. Подкаменная Тунгуска.
3. Получить новые данные о геохимии и минералогии пород верхоленской серии, уточнить палеоклиматические условия их формирования.

**Объект и предмет исследования.** Объект исследования – породы иниканской свиты из береговых обнажений р. Юдома, разреза эвенкийской свиты р. Подкаменная Тунгуска, верхоленской серии из обнажений р. Малая Чуя. Предмет исследования – палеогеографические реконструкции для указанных объектов.

**Фактический материал и методика исследований.** В основу диссертации положен каменный материал, отобранный автором в ходе полевых работ на р. Подкаменная Тунгуска (эвенкийская свита), а также отобранный и предоставленный Г.А. Калмыковым (МГУ) из обнажений иниканской свиты, В.Э. Павловым (ИФЗ РАН) из обнажений верхоленской серии.

Для пород иниканской свиты проанализированы: содержание общего количества органического углерода (пиролиз), содержание петрогенных оксидов (рентгенофлюоресцентный анализ, 46 образцов), элементный состав (рентгенофлюоресцентный анализ и ICP MS, 28 образцов) минеральный состав (рентгеновская дифрактометрия, 16 образцов), изотопный состав углерода и кислорода (7 образцов). 5 образцов иниканской свиты задействованы в экспериментальной работе с измерением аморфного кремнезема. Для 85 образцов эвенкийской свиты измерено содержание петрогенных оксидов (ICP AES), а также определен изотопный состав углерода и кислорода (74 образца). В 35 образцах пород верхоленской серии выполнено определение концентрации главных оксидов и некоторых микроэлементов (рентгенофлюоресцентный анализ). Для единичных образцов иниканской, эвенкийской, верхоленской свит выборочно выполнены SEM (сканирующая электронная микроскопия) исследования.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается достаточным объемом выборки исследуемого фактического материала, применением современного высокоточного оборудования, сходимостью результатов с имеющимися на данный момент в литературе данными и теоретическими представлениями. Основные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в базы данных RSCI и Scopus.

**Личный вклад автора.** Автор принимал личное участие в полевых работах на р. Подкаменная Тунгуска (2022 г.), в ходе которых выполнил геологическое наблюдение и опробование пород эвенкийской свиты. Автором выполнялась интерпретация всех полученных литологических и геохимических данных, а также их концептуальное обобщение. Соискатель (в качестве первого автора) внес существенный вклад в написание 5 статей по теме диссертации в научные журналы, рецензируемые RSCI и Scopus. Также проведение всех этапов экспериментов по щелочному разложению пород и подсчета содержания аморфного кремнезема (кроме ICP-AES измерений) выполнено лично соискателем.

**Научная новизна.** Впервые для пород иниканской свиты составлена концептуальная модель окислительно-восстановительной зональности и стратификации водной толщи, сопоставленная с региональными данными. Разработана уточненная модель формирования эвенкийской свиты, выполнено ее высокодетальное опробование,

впервые определен изотопный состав слагающих пород. Получены новые данные о геохимии верхоленской серии, которые применены для уточнения условий ее формирования. Впервые выполнено элементное картирование (SEM) для образцов иниканской, эвенкийской свит и верхоленской серии.

**Защищаемые положения:**

1. Породы иниканской свиты р. Юдома накапливались в условиях устойчивой стратификации, аноксии, периодической эвксинии природных вод в тойинском и амгинском веках. Субоксические условия возникали в раннеботомское и раннемайское время.

2. Породы эвенкийской свиты формировались в пределах верхней литорали, эпизодически сменяемой условиями нижней супралиторали. Это обстановки приливно-отливных отмелей, ассоциированных с прибрежными себхами.

3. В разрезе верхней части верхоленской серии, соответствующей аюссоканскому-сакскому векам, установлены крупные интервалы изменения характера выветривания в области денудации. Определены два таких интервала: 1) преимущественного усиления химического выветривания, связанный с потеплением или гумидизацией климата, 2) усиления физического выветривания за счет похолодания или аридизации.

**Теоретическая и практическая значимость.** Данные, полученные по редокс-условиям в водах иниканского бассейна и климатическим вариациям в интервале формирования верхоленской серии, дополняют палеорекострукции для кембрия как в региональном плане (для поиска и прогноза полезных ископаемых), так и для глобального понимания процессов эволюции ранних океанов. Результаты изучения разреза эвенкийской свиты позволяют уточнить ее фациальную принадлежность и региональные реконструкции.

**Апробация работы и публикации.** Результаты исследований докладывались автором на Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2021, 2023), XXXIII молодежной научной школе-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии» (2022), XXV Международной научной конференции (Школе) по морской геологии (2023), XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием для молодых учёных по проблемам водных и наземных экосистем «Понт Эвксинский – 2023».

По результатам исследования опубликовано 5 статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных RSCI и Scopus, основополагающий вклад в которых принадлежит соискателю, и 4 работы представлены в материалах совещаний и тезисах на конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Работа объемом 163 страницы содержит 56 иллюстраций, 7 таблиц и приложения (8 таблиц, 5 рисунков). Список литературы включает 304 источника.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.г.-м.н. доценту Руслану Рустемовичу Габдуллину за предоставленную возможность заниматься изучением интересующих научных вопросов и поддержку на всех этапах выполнения этой работы.

Автор благодарен д.г.-м.н. профессору Г.А. Калмыкову (МГУ) за предоставление материала для исследований, консультации и поддержку. Также автор выражает

благодарность д.ф.-м.н. профессору В.Э. Павлову (ИФЗ РАН) за предоставление материала и конструктивную критику. Соискатель выражает благодарность д.б.н. профессору А.Ю. Журавлеву (МГУ) за конструктивную критику и постоянные консультации. Автор благодарен д.г.-м.н. М.А. Левитану (ГЕОХИ РАН) за консультации и помощь.

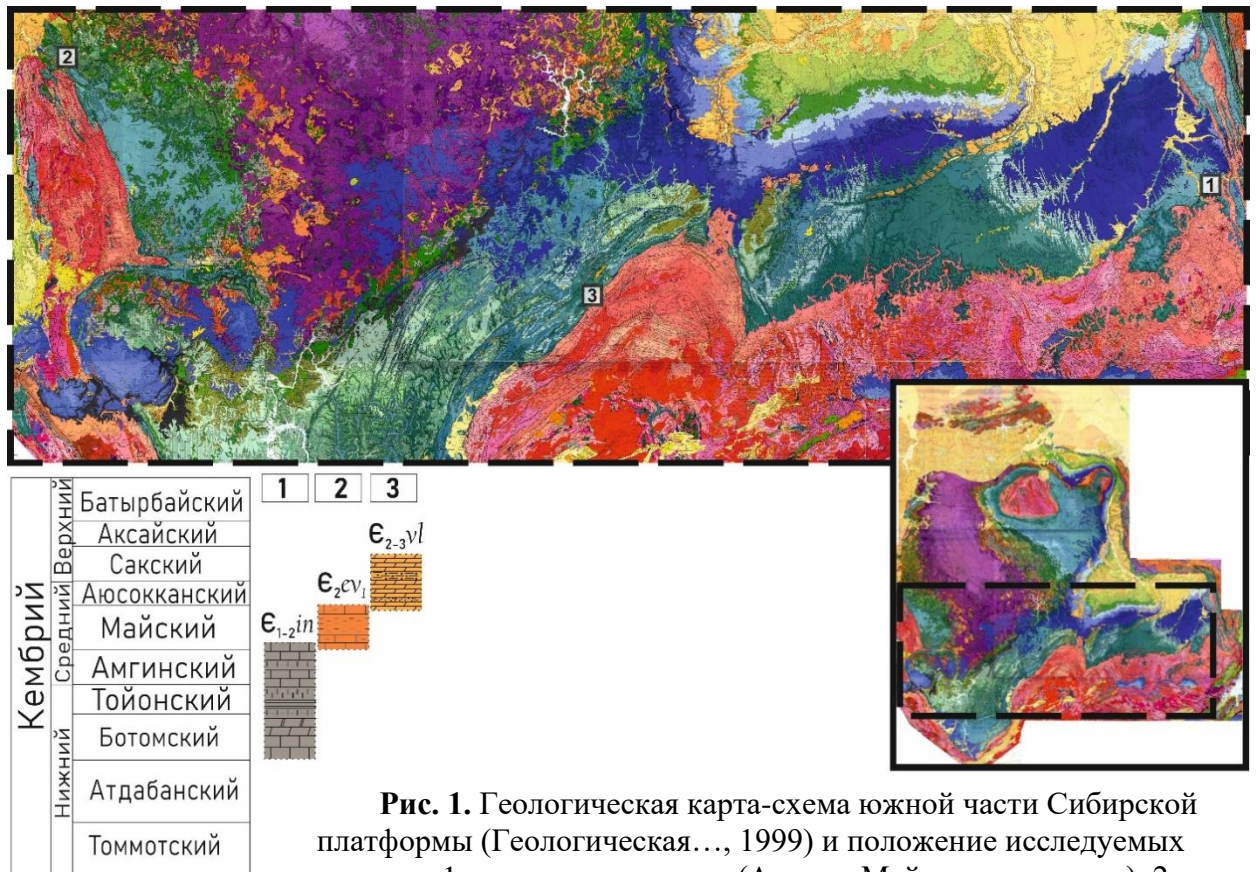
Автор выражает благодарность сотрудникам геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова к.г.-м.н. Е.В. Карповой, к.г.-м.н. Е.А. Красновой, А.С. Грязновой, В.Л. Косорукову, к.г.-м.н. В.О. Япаскурту, д.г.-м.н. А.Ю. Бычкову; сотрудникам центра коллективного пользования «Электронная микроскопия в науках о жизни» МГУ им. М.В. Ломоносова (УНУ «Трехмерная электронная микроскопия и спектроскопия»), особенно к.б.н. М.М. Широян (Сусленковой). Автор выражает отдельную благодарность к.г.н. доценту географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова А.А. Медведкову за предоставление возможности участия в полевых работах на р. Подкаменная Тунгуска. Автор благодарен сотрудникам химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова к.х.н. И.В. Михееву, к.х.н. И.Ф. Серегиной и д.ф.-м.н. М.А. Большову. Также автор выражает благодарность сотрудникам ПГНИУ А.Ю. Пузику, И.В. Бадьяновой, к.х.н. М.А. Волковой, к.г.-м.н. К.П. Казымову, сотруднику ИГЕМ РАН А.И. Якушеву за проведение аналитических исследований. Автор благодарит сотрудника ГИН РАН В.Л. Злобина за предоставление программы MINLITH. Автор признателен д.г.-м.н. профессору географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова В.С. Савенко. Также автор благодарит д.г.-м.н. заведующего лабораторией палеоэкологии и биостратиграфии ИО РАН А.Г. Матуля за консультации и поддержку.

В конце хочется выразить отдельную благодарность моим друзьям, близким и особенно родителям – к.с.-х.н. Л.Ф. Кошелевой и к.с.-х.н. И.А. Кошелеву за всестороннюю помощь на протяжении выполнения и написания этой работы.

## **II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **ГЛАВА 1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В главе приведена краткая характеристика Сибирской платформы, а также структуры и строения регионов исследования – Алдано-Майской синеклизы, Байкитской антеклизы, Непско-Ботубинской антеклизы и Предпатомского регионального прогиба, в пределах которых находятся изучаемые разрезы (рис. 1).



**Рис. 1.** Геологическая карта-схема южной части Сибирской платформы (Геологическая..., 1999) и положение исследуемых разрезов. 1 – иниканская свита (Алдано-Майская синеклиза), 2 – эвенкийская свита (Байкитская антеклиза), 3 – верхоленская серия (Непско-Ботуобинская антеклиза и Предпатомский прогиб).

## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В разделе описаны методы лабораторных исследований, а также приведены методы последующего анализа и интерпретации полученных данных. Подробнее рассмотрим последнее.

Для восстановления *редокс-условий* использовались редокс-чувствительные металлы – Mo, U, обогащающие отложения в восстановительных условиях. Также Zn и Mo обогащают сульфиды и активно удаляются с органическими агрегатами из воды в H<sub>2</sub>S-зоне, накапливаясь в илах (Емельянов, 1998). Концентрации Mo в диапазоне 2–25 ppm указывают на бескислородные условия, концентрации >100 ppm интерпретируются как устойчивые эксинные условия (Scott, Lyons, 2012). Промежуточное обогащение Mo (25–100 ppm) может отражать либо прерывистую эксинию, либо истощение Mo в бассейне (Algeo and Lyons, 2006; Scott, Lyons, 2012). Ковариации содержаний U и Mo также являются эффективным палеоэкологическим индикатором. Это обусловлено различным геохимическим поведением U и Mo. Поглощение аутигенного U морскими отложениями начинается на окислительно-восстановительной границе Fe(II)–Fe(III), т.е. в субкислородных условиях, опосредованно контролируется бактериальной сульфатредукцией, не связанной с количеством свободного H<sub>2</sub>S и не зависящей напрямую от окислительно-восстановительного цикла Fe и Mn в водной толще, тогда как аутигенное обогащение Mo требует присутствия H<sub>2</sub>S, т.е. эксинных условий (Tribovillard et al., 2012). Привнос «водного» Mo в осадок может усиливаться за счет переноса твердых частиц, в то время как водный U не затрагивается этим процессом.

Ковариация U-Mo выражается через коэффициент обогащения (Algeo, Tribovillard, 2009; Tribovillard et al., 2012):

$$X - EF = [(X/Al)_{\text{образец}}] / [(X/Al)_{\text{PAAS}}]$$

где X – содержания элементов (U и Mo) в образце и в PAAS соответственно (Taylor, McLennan, 1985), EF – коэффициент обогащения.

Доля урана аутигенного ( $U_a$ ) является индикатором редокс-обстановок в придонном слое вод (Wignall, Myers, 1988; Wignall, 1994). Так, значения  $U_a$  (ppm) < 2 указывают на окисческие условия;  $2 < U_a < 10$  – на субокисческие;  $10 < U_a < 15$  – на анокисческие,  $U_a > 15$  – эвксинные (Wignall, 1994).

Доля урана аутигенного ( $U_a$ ) в общем содержании урана ( $U_{\text{total}}$ ), находящегося в породах (Wignall, Myers, 1988):

$$U_a = U_{\text{total}} - Th/3$$

Другим индикатором является отношение Mo/Mn, основанное на том, что при сероводородном заражении наддонных морских вод молибден в форме молибденита усиленно осаждается на дно, тогда как поступление марганца в осадок ограничивается его растворением в наддонных водах (Холодов, Недумов, 1991). Сотые доли отношения Mo/Mn типичны для аноксидной среды, тысячные – для кислородной (Холодов, 2006).

На основе результатов рентгеноспектрального флуоресцентного анализа для верхоленской серии выполнен *расчет нормативного минерального состава* с применением программы MINLITH (Розен и др., 2000). Ошибка вычислений по программе MINLITH для большинства случаев находится в пределах 5-15% отн., и только при содержаниях минерала менее 5% масс., она достигает 60-70% отн. (Розен, Аббясов, 2003). По этой причине в текущем исследовании приводятся данные по наиболее значимым в процентном отношении содержаниям минералов, что, даже с поправкой на вышеуказанную ошибку, позволяет судить об определенных изменениях в составе пород.

## ГЛАВА 3. ЧЕРНОСЛАНЦЕВЫЙ БАССЕЙН (РАННИЙ-СРЕДНИЙ КЕМБРИЙ)

### 3.1. Состояние изученности

Дискуссия об окислительно-восстановительных условиях в водах куонамского/иниканского морей нижнего и среднего кембрия и их осадках ведется с 1960-70 гг. (Конторович и др., 1970, 1976; Гурари и др., 1984 и мн. др.). А.Э. Конторович и В.Е. Савицкий (1970) предполагали отсутствие сероводородного заражения при отложении осадков куонамского типа, а условия среды в бассейне реконструируются как исключительно благоприятные (комфортный температурный режим акваторий, сравнительное их мелководье, хорошая аэрация придонной зоны, а также «пониженная» соленость вод бассейна). Другую точку зрения высказывал Ф.Г. Гурари с соавторами (1984). Это существование экстремальных условий в придонной части бассейна с сероводородным заражением, наложивших отпечаток как на биоту, так и на геохимию осадков. Позднее в работах (Гурари и др., 1984; Парфенова и др., 2008, 2017, 2018) обсуждалось, что поле сероводородного заражения не было постоянным – оно перемещалось и по вертикали в водной толще, и по площади бассейна.

Важное концептуальное палеоокеанологическое обобщение представлено в работе Р. Тостевин и Б. Дж. У. Миллса (2020). Авторы показывают, что в бескислородных (по большей своей части) неопротерозойско-раннепалеозойских океанах могли существовать слои кислородных поверхностных вод, лежащие над полностью бескислородными



глубинными водами, образуя двухслойную структуру, или в виде зон кислородного минимума. Для эдиакарских океанов была предложена «модель эвксинного клина» (Li et al., 2010), в которой есть промежуточная эвксинная водная масса, зажатая внутри железистых (обогащенных Fe(II)) глубинных вод, и касающаяся континентального шельфа. В этой модели в стратифицированном океане одновременно сосуществовали кислородные, сульфидные и железистые зоны, чему благоприятствовали общие низкие концентрации сульфатов в океане. Этот клин динамически развивался в пределах переменного диапазона глубин воды между кислородным поверхностным слоем и глубинной железистой водной массой (т.е. от шельфа к обстановкам континентального склона и абиссали). Его размеры и расположение зависели от локального биогеохимического баланса Fe-S-C, на который влияли тектонические, климатические, палеогеографические и другие факторы (Li et al., 2010, 2020). Более поздние исследования показали, что модель эвксинного клина применима и к раннекембрийскому океану (см. обзор Li et al., 2020).

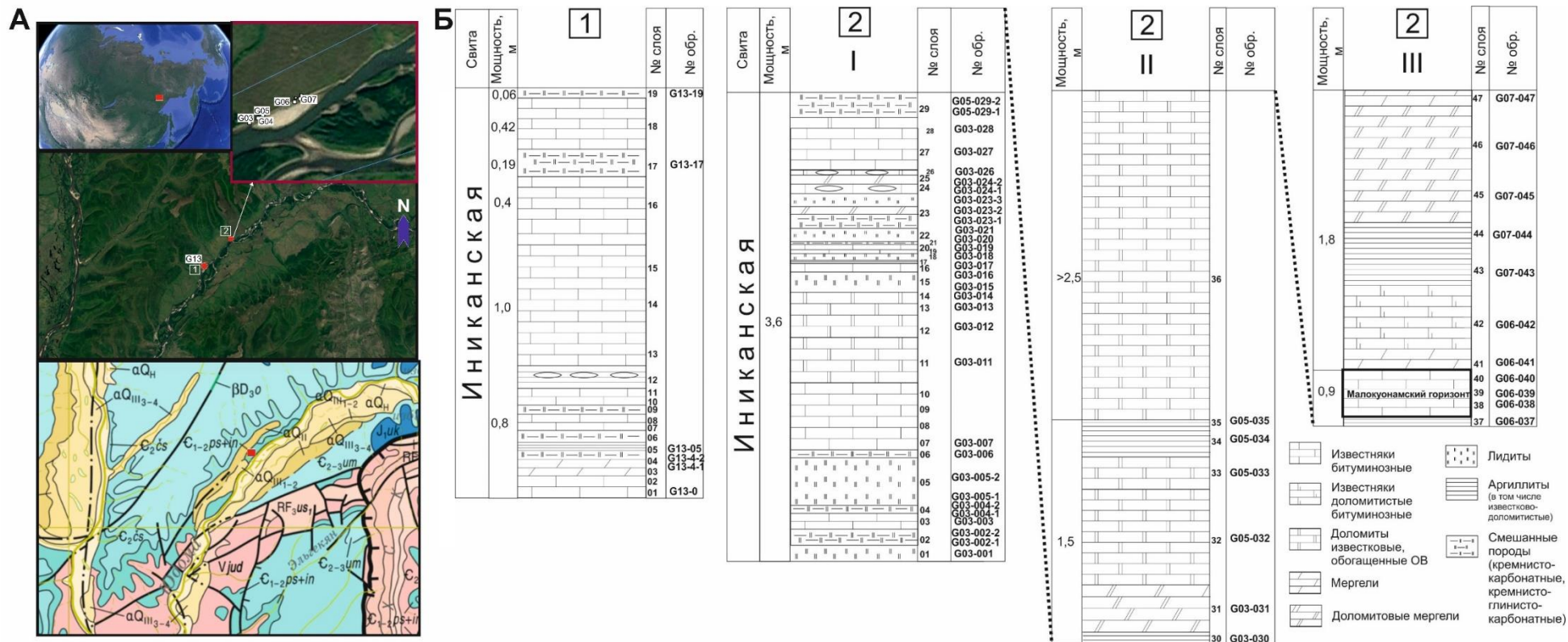
Кратко резюмируя, преобладание аноксии в глубинах раннекембрийского океана было результатом в целом низких уровней  $O_2$  в атмосфере в сочетании с устойчивой окислительно-восстановительной стратификацией, которая, вероятно, была связана с низкими скоростями вертикального перемешивания. В связи с этим, исследования иниканских разрезов р. Юдома необходимы как вклад в изучение и понимание гидрологических процессов и химии морской среды, оксигенации океана, изменения океанической циркуляции в раннем и среднем кембрии.

### 3.2. Краткое описание разреза

Породы иниканской свиты ( $\epsilon_{1-2in}$ ) изучены в обнажениях правого берега р. Юдома. В работе рассмотрены образцы из разрезов двух участков: Г13 и Г03..07 (рис. 2). Участок Г13 представляет собой нижнюю часть разреза и находится вблизи перехода к подстилающим отложениям пестроцветной свиты ( $\epsilon_{1ps}$ ). Участок Г03..07 является верхней частью разреза. Далее отложения согласно перекрывают зеленовато-серые карбонатные породы чайской свиты ( $\epsilon_{2cs}$ ). Породы иниканской свиты в изученном обнажении представлены черными высокоуглеродистыми известняками, кремневыми, часто доломитистыми, доломитами известковыми, мергелями (в том числе, доломитовыми), аргиллитами известковистыми и известковисто-доломитистыми, лидитами, а также породами смешанного состава (кремнисто-карбонатного и кремнисто-глинисто-карбонатного).

### 3.3. Минералогические особенности

В породах повсеместно содержится пирит, в том числе фрамбоидальный. Фрамбоиды пирита, возможно, представляют более раннюю генерацию, осаждающуюся с участием  $H_2S$  в результате бактериальной сульфатредукции (Юрченко, 2017). Также характерно наличие барита и сфалерита. Барит ассоциирован с сгустками органического вещества и фосфатами, замещающими органические остатки. Фосфаты представлены апатитом, содержание которого достигает 6%. Фосфатные минералы замещают органические остатки. Сфалерит выполняет микропрожилки. Разложение органического вещества способствовало высвобождению ионов фосфата и цинка в поровую воду, что привело, по-видимому, к осаждению апатита и сфалерита. Барит также, вероятно, осаждался в микросредах частиц взвеси вследствие высвобождения при разложении ОВ микроорганизмами (Paytan, Griffith, 2007; Леин, Кравчишина, 2021).



**Рис. 2.** Изученный разрез иниканской свиты бассейна р. Юдома. *А* – современное положение, цифры обозначают номера участков, *Б* – строение разреза на участках Г13 (1) и Г03..07 (2).

### 3.4. Геохимические особенности

Для всех проанализированных литологических разностей (известняки, доломиты, мергели, аргиллиты, смешанные породы, лидиты) характерно обогащение В, Ni, Мо (до 76 раз), Ag (до 29 раз), Sb (в среднем – в 8 раз, в образце G03-024(2) – 190 раз), U (до 22 раз) и обеднение Cs, Ba, Rb, Y, Th. Также для терригенных и смешанных пород характерно незначительное обогащение Sr, Pb, Tl, для карбонатных – Cr, Tl, лидитов – Sc, Cr, Zn, Li.

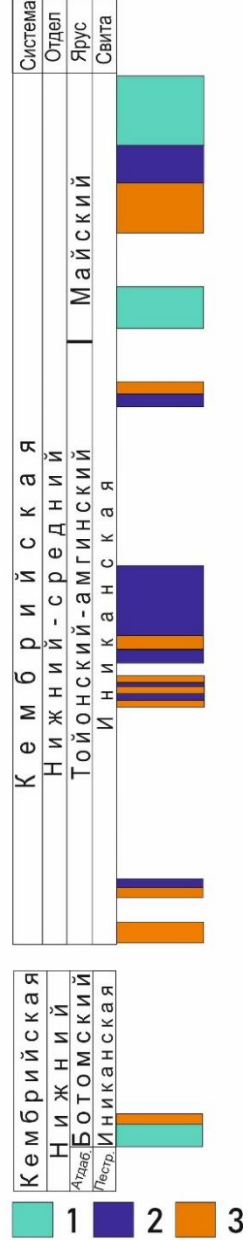
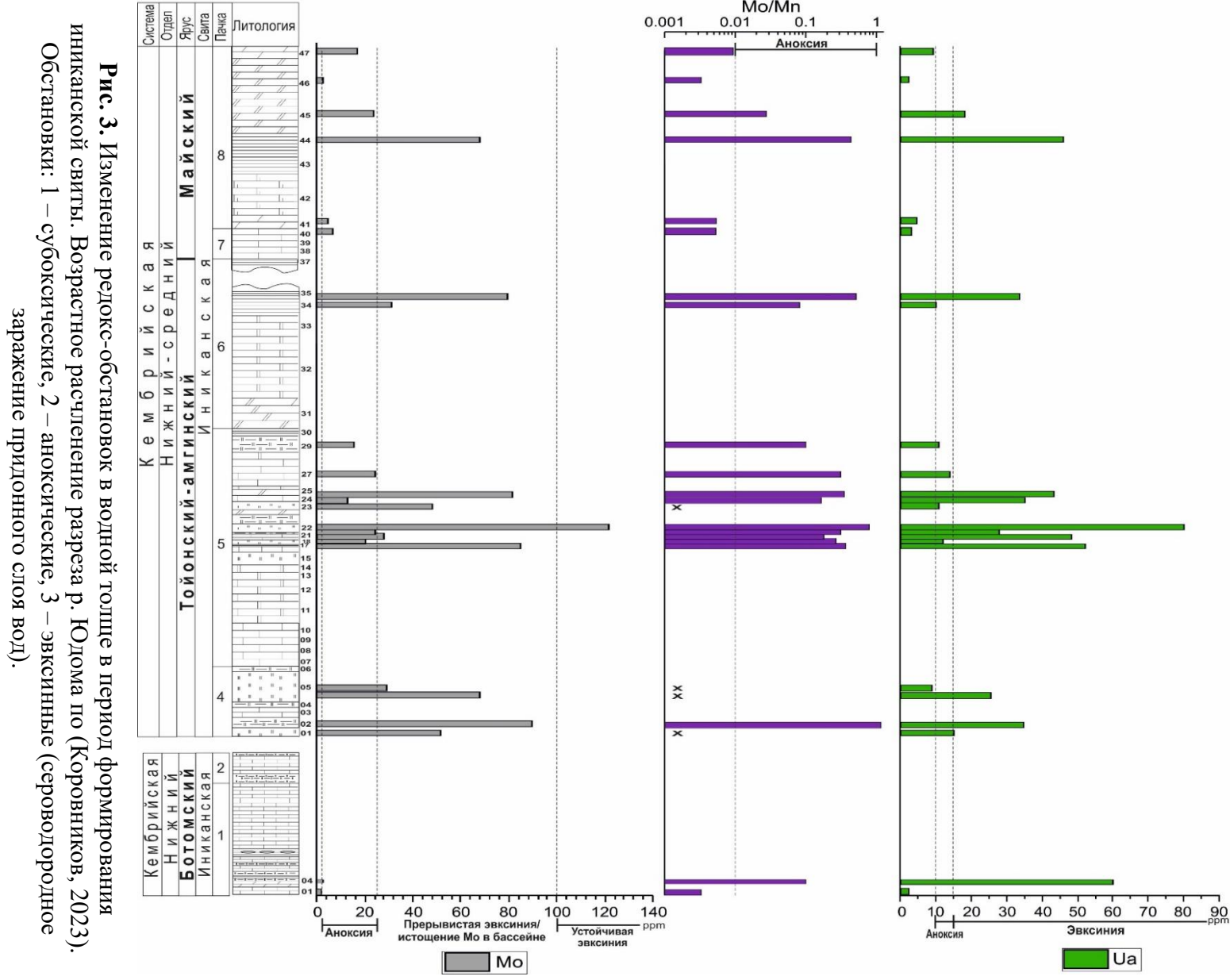
Проанализирован изотопный состав карбонатов смешанных пород, доломитов, известняка и лидита. Породы обеднены  $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$  (от -3.17‰ до 1.02‰) и  $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$  (от -22.38‰ до -4.66‰). Наиболее обогащен (относительно других) образец известкового доломита, отобранный из малокуонамского маркирующего горизонта.

### 3.5. Палеогеографическая интерпретация

Для разделения палееоредокс-условий используется следующая окислительно-восстановительная градация (Tyson, Pearson, 1991; Tribovillard et al., 2006): окислительные, субокислительные, аноксислительные. Аноксислительные условия могут быть несурьфидными или сурьфидными; в последнем случае их называют эвксинными – они характеризуются наличием сероводорода в водной толще. Субокислительные условия характеризуются чрезвычайно низкими, но, как правило, ненулевыми концентрациями кислорода в толще воды, а присутствие  $\text{H}_2\text{S}$  ограничивается поровыми водами ниже границы «вода-осадок».

Концентрации Мо, согласно условному делению по (Algeo and Lyons, 2006; Scott, Lyons, 2012), указывают на бескислородные условия, иногда устойчивые эвксинные условия, а также промежуточное обогащение (либо прерывистая эвксиния, либо истощение Мо в бассейне): наименьшие содержания Мо характерны для нижней части разреза вблизи предполагаемого контакта с пестроцветной свитой (1.8–2.4 ppm) и пород вблизи малокуонамского горизонта (4.6–6.2 ppm), в остальных образцах содержания Мо в диапазоне 12.7–121.8 ppm. Ковариации содержаний U-Мо и диагностическая диаграмма редокс обстановок (по Algeo, Tribovillard, 2009; Tribovillard et al., 2012) позволяет сделать вывод о преобладании аноксислительных условий с периодами возникновения как эвксинных, так и субокислительных условий. Значения аутигенного урана (Ua) указывают на преобладание аноксислительных (10–15 ppm (Wignall, 1994)) и эвксинных обстановок (Ua > 15 ppm (Wignall, 1994)), с редкими субокислительными (2–10 ppm (Wignall, 1994)) в придонном слое вод. Отношение Мо/Mn (Холодов, Недумов, 1991; Холодов, 2006) для большей части пород демонстрирует аноксислительные условия (значение модуля 0.1 – 1.17), субокислительные условия характерны для пород нижней части разреза вблизи контакта с пестроцветной свитой, верхней части малокуонамского горизонта и доломитов вблизи перехода к чайской свите, что в точности согласуется с данными по U-EF-Мо-EF и Ua.

Таким образом, субокислительным условиям отвечают породы нижней части разреза иниканской свиты вблизи предполагаемого контакта с пестроцветной свитой, породы малокуонамского маркирующего горизонта (и вблизи контакта с ним) и близ перехода к чайской свите. Для других изученных пород разреза установлено формирование в преимущественно аноксислительных условиях, которые, вероятно, неоднократно могли прерываться краткими (сотни-тысячи лет) кислородными событиями, не фиксируемыми при текущей детальности отбора проб для геохимических исследований (рис. 3). Развитие таких аноксислительных и эвксинных условий в придонном слое вызвано устойчивой стратификацией океана, существовавшей в ранне-среднекембрийское время в данной части бассейна.



Исходя из этого, формулируется **первое защищаемое положение**: «Породы иниканской свиты р. Юдома накапливались в условиях устойчивой стратификации, аноксии, периодической эвксинии природных вод в тойнском и амгинском веках. Субоксические условия возникали в раннеботомское и раннемайское время».

### 3.6. Особенности генезиса лидитов

Образование мощных (толщина отдельных слоев до 20 см) и достаточно выдержанных по простиранию лидитов иниканской свиты требует большого притока кремнезема, что может быть следствием гидротермального привноса. Величина Ge/Si в современной морской воде составляет 0.72  $\mu\text{моль/моль}$ , что значительно ниже, чем в наземных и гидротермальных флюидах – около 5  $\mu\text{моль/моль}$  (Tribovillard et al., 2011; Tribovillard, 2013). Для изученных лидитов иниканской свиты характерны величины Ge/Si ( $\mu\text{моль/моль}$ ) от 0.36 до 1.64 близкие к таковым в морской воде, что свидетельствует об отсутствии активности гидротермальных систем вблизи рассматриваемой точки и прямого влияния на образование данных пород.

### 3.7. Методические проблемы определения содержания аморфного кремнезема

В исследовании рассмотрены аспекты применения трех основных способов подсчета доли аморфного кремния из общего количества извлеченного кремния после щелочного разложения (*wet alkaline digestion*) – одностадийный, «Si/время» (*Si/time*) и «Si/Al» (Eggimann et al., 1980; DeMaster, 1981, Mortlock, Froelich; 1989). В результате проведенных экспериментов по выщелачиванию установлено, что из трех способов подсчета содержания аморфного кремнезема из общего измеренного содержания Si в кембрийских породах с низким содержанием такового, наиболее оптимальными становятся методы Si/время и Si/Al (DeMaster, 1981; Eggimann et al., 1980). При незначительном расхождении между средними полученными этими двумя методами величинами аморфного кремнезема, для терригенных пород предпочтительным является метод Si/Al.

## ГЛАВА 4. ЭВЕНКИЙСКАЯ СВИТА (СРЕДНИЙ КЕМБРИЙ)

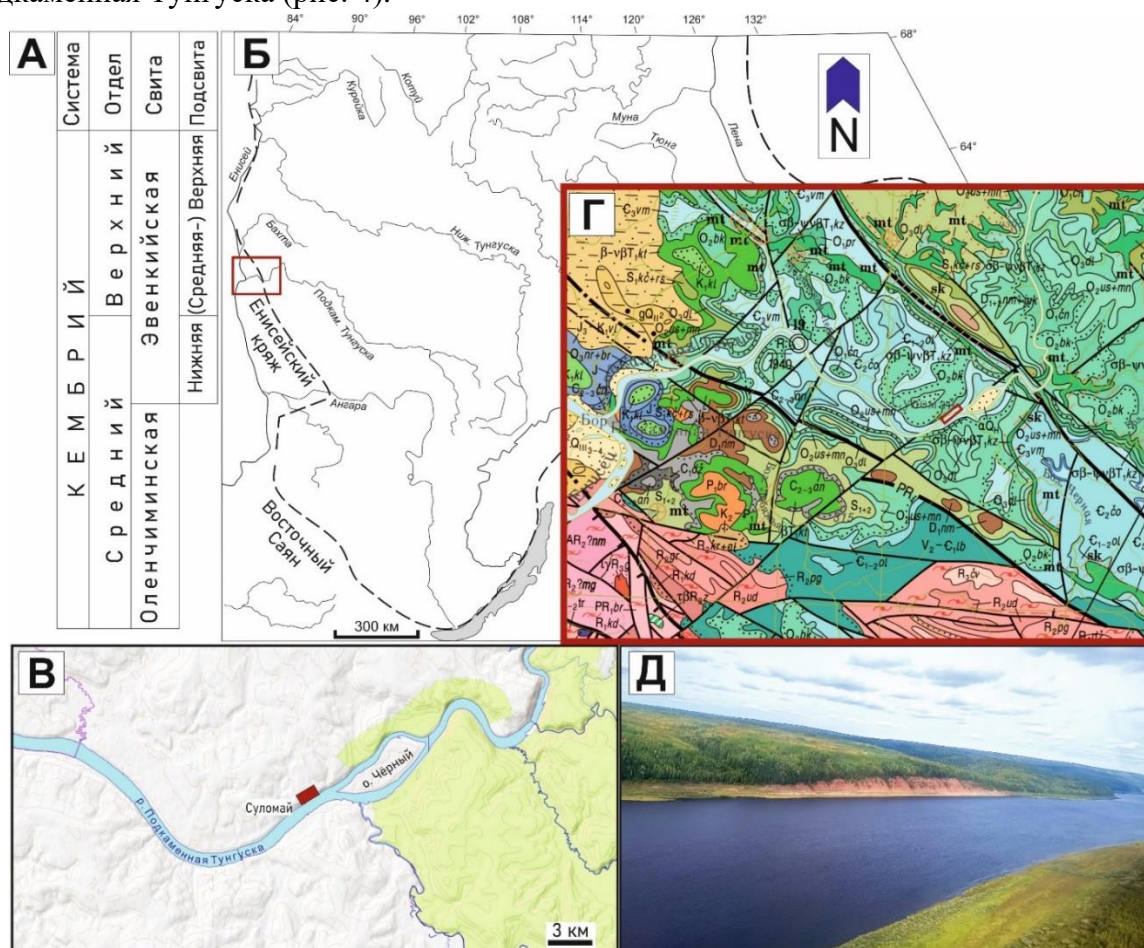
### 4.1. Состояние изученности

В разделе рассмотрены основные взгляды на формирование эвенкийской свиты на Сибирской платформе. Это обстановки: субаэральных надприливных равнин/себхи (Сухов и др., 2016), мелководно-морские/лагунные (Жарков, 1968), с преимущественно штормовым режимом (Сараев и др., 2004). Далее рассмотрены особенности строения себх (Обстановки ..., 1990; Reading, 1996; Strohmenger et al., 2011). Показано, что приливно-отливные отмели, выполняющие обширные пространства побережий в районах с низкой энергией волн, тесно ассоциированы с себхами, но не всегда включаются в состав последних. Отмечают (Обстановки ..., 1990), что для литоральных отмелей характерен непрерывный переход от преимущественно илистых, расположенных вблизи уровня высокой воды (верхняя литораль и супралитораль), до преимущественно песчаных, расположенных на участках низкой воды (сублитораль и нижняя литораль) (Evans, 1975; Klein, 1971; Reineck, 1967, 1972; Straaten, 1954, 1961). Обсуждаются аспекты палеогеографической реконструкции древних и описание современных приливных процессов, а также связанных с ними осадочных последовательностей (Зенкович, 1962; Егоров, 1974; Сафьянов, Соловьева, 2005; Долотов, 2010; Hayes, 1979; Dean, Dalrymple,

2004; Longhitano et al., 2012). Для литоральных образований в составе карбонатно-соленосной формации венда–нижнего кембрия исследователями применяется термин «тайдалиты» (Кузнецов и др., 2000; Кузнецов, Журавлева, 2019). На основе анализа отложений приливно-отливных зон (тайдалитов) и себх венда-кембрия, было показано строение слагающих их циклитов, а также отличие от современных себховых отложений (Кузнецов, Сухы, 1990; Кузнецов и др., 2000; Kuznetsov, Suchy, 1992).

#### 4.2. Краткое описание разреза

В разделе приводится описание изучаемого разреза эвенкийской свиты на р. Подкаменная Тунгуска (рис. 4).



**Рис. 4.** Положение исследуемого разреза эвенкийской свиты. А – стратиграфическое, Б, В – в региональном плане (пунктирная линия – граница Сибирской платформы), Г – на геологической карте (Государственная ..., 2010) – нижнеэвенкийской подсвите соответствует обозначение  $C_2so$ , верхнеэвенкийской  $C_3vt$ . Д – общий вид. Красным прямоугольником обозначено положение разреза на юго-западной периферии Среднесибирского плоскогорья, к северу от Енисейского кряжа.

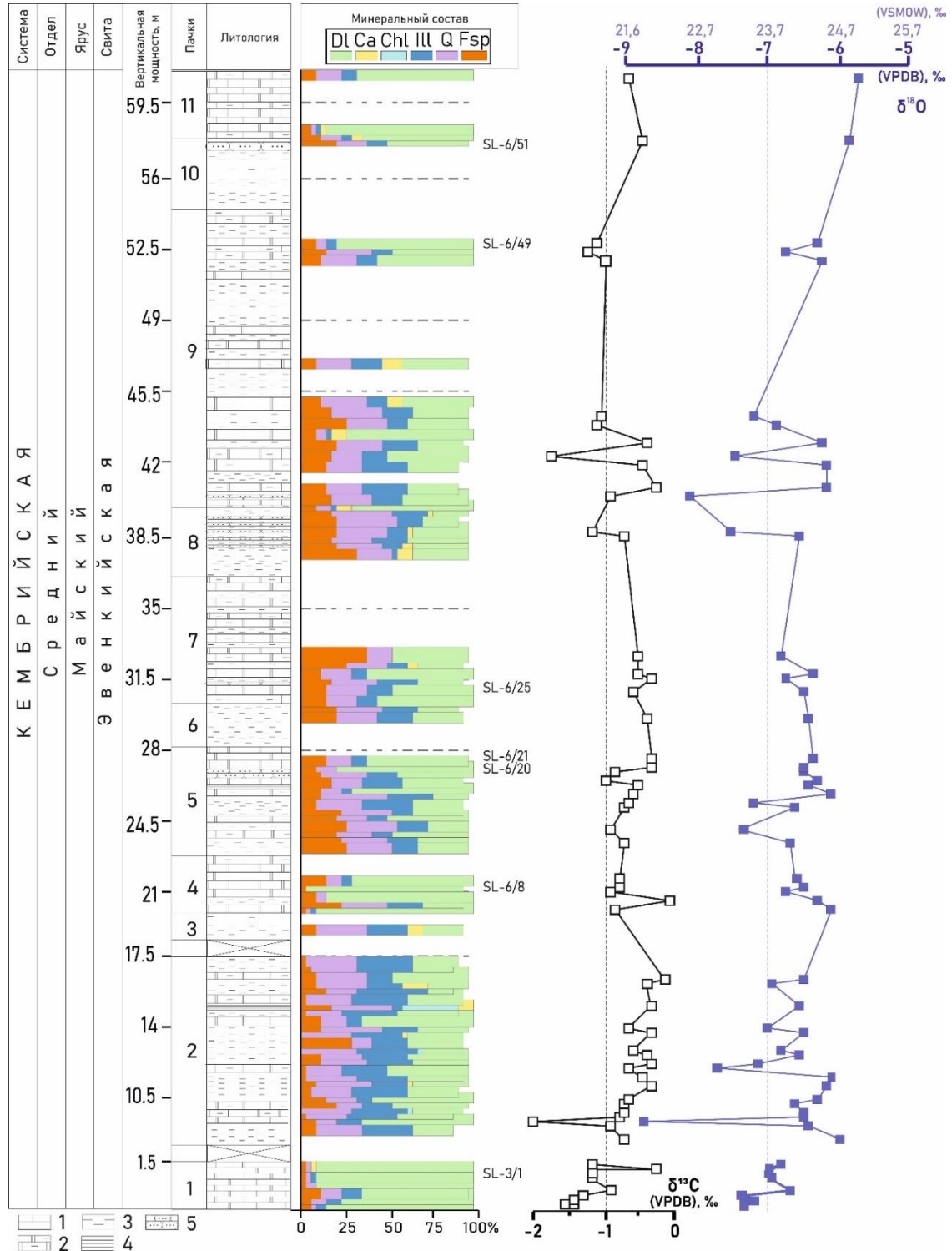
#### 4.3. Геохимические особенности

Раздел содержит результаты определения главных петрогенных окислов и данные изотопных исследований (рис. 5). Проанализированные породы обеднены  $\delta^{13}C_{\text{карб}}$  (от -2.1‰ до -0.1‰) и  $\delta^{18}O_{\text{карб}}$  (от -11.3‰ до -5.7‰). Несмотря на то, что значения  $\delta C^{13}$  в образцах пород эвенкийской свиты лежат в пределах зарегистрированного диапазона значений  $\delta C^{13}$  кембрийской морской воды от -2.5 до 2 ‰ PDB (Montañez et al., 2000; Veizer et al., 1999; Saltzman, 2005), значительная корреляция между величинами  $\delta^{13}C$  и

$\delta^{18}\text{O}$  (коэффициент корреляции 0.6) свидетельствует об эпигенетических преобразованиях пород.

#### 4.4. Минеральный состав, его особенности, формы нахождения элементов

Приведена характеристика нормативного минерального состава (рис. 5), рассчитанного на основе главных петрогенных окислов, а также результаты SEM-исследований.

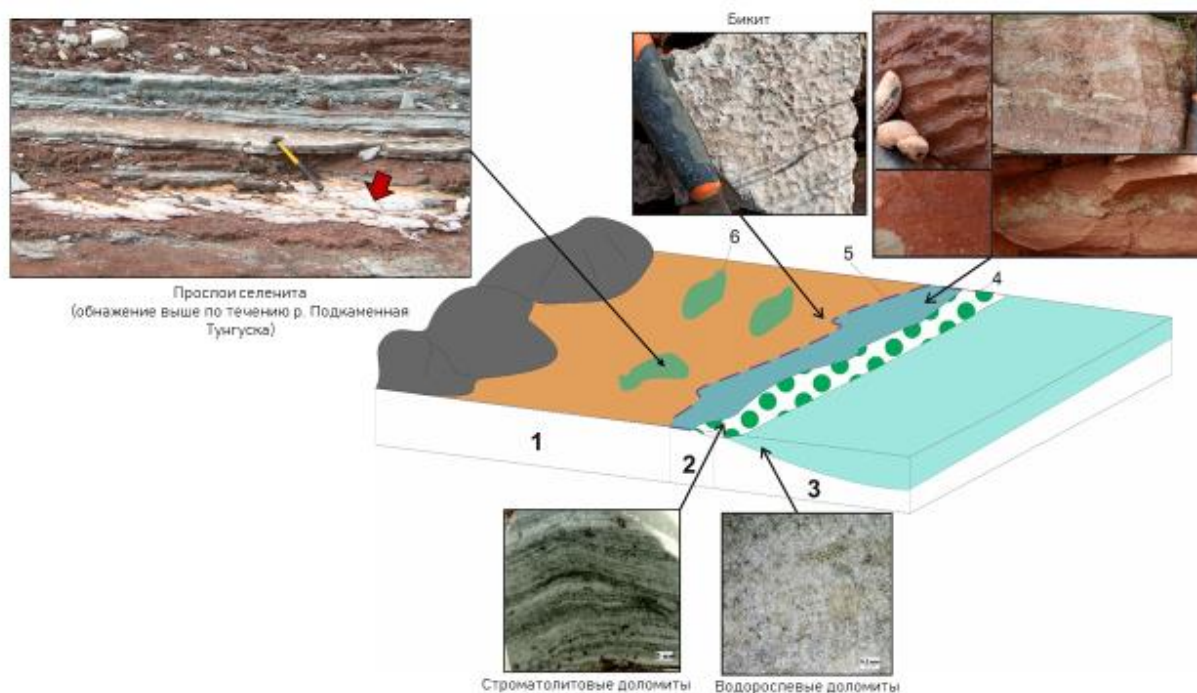


**Рис. 5.** Разрез эвенкийской свиты на р. Подкамennая Тунгуска и его изотопная характеристика. Условные обозначения: литология: 1 – доломиты, 2 – доломиты алевроглинистые, 3 – алевролиты доломитовые, 4 – аргиллиты, 5 – песчаники. Минеральный состав: Q – кварц, минералы кремнезема, Fsp – полевые шпаты, Ill – гидрослюды (иллит) и слюды, Chl – хлорит, Ca – кальцит, Dl – доломит.

#### 4.5. Фациальная интерпретация

В исследуемом разрезе эвенкийской свиты не наблюдается характерных для себхи линз, корок, желваков гипса и ангидрита – только единичные реликтовые поры выщелачивания в алевро-глинистых доломитах (но выдержанные прослои селенита отмечены в обнажении эвенкийской свиты выше по течению р. Подкаменной Тунгуски, рис. 6). При этом присутствуют: знаки волновой ряби, текстуры синседиментационных деформаций, тонкая пологоволнистая, пологая косая, градационная слоистость, наличие интракластов в породах, зональные структуры бикита. Расчет нормативного минерального состава демонстрирует изменения фациальных обстановок и режима поступления обломочных компонентов. Так, наиболее «чистые» доломиты (например, пачка 1) формировались в нижней части литоральной зоны. Затем, при проградации береговой зоны, происходит смена обстановок на верхнюю литораль-супралитораль и увеличивается содержание терригенных компонентов в породах. Сохранность КПШ и нарастание их доли в разрезе свидетельствует о преобладании процессов физического выветривания.

На основании вышеописанных особенностей разреза эвенкийской свиты в долине нижнего течения р. Подкаменная Тунгуска, а также анализа взглядов на формирование современных и древних себховых и некоторых береговых фаций, можно сделать следующий вывод: изученные породы эвенкийской свиты формировались преимущественно в условиях верхней литорали (рис. 6).



**Рис. 6.** Схема палеогеографических обстановок в период формирования эвенкийской свиты (не в масштабе). 1 – супралитораль (себха), 2 – литораль, 3 – sublитораль, 4 – строматолиты, 5 – граница высокого прилива, 6 – соленые бессточные озера, образующиеся в регрессивную стадию.

Таким образом, **второе защищаемое положение:** «Породы эвенкийской свиты формировались в пределах верхней литорали, эпизодически сменяемой условиями нижней супралиторали. Это обстановки приливно-отливных отмелей, ассоциированных с прибрежными себхами».



## ГЛАВА 5. ВЕРХОЛЕНСКАЯ СЕРИЯ (СРЕДНИЙ-ВЕРХНИЙ КЕМБРИЙ)

### 5.1. Состояние изученности

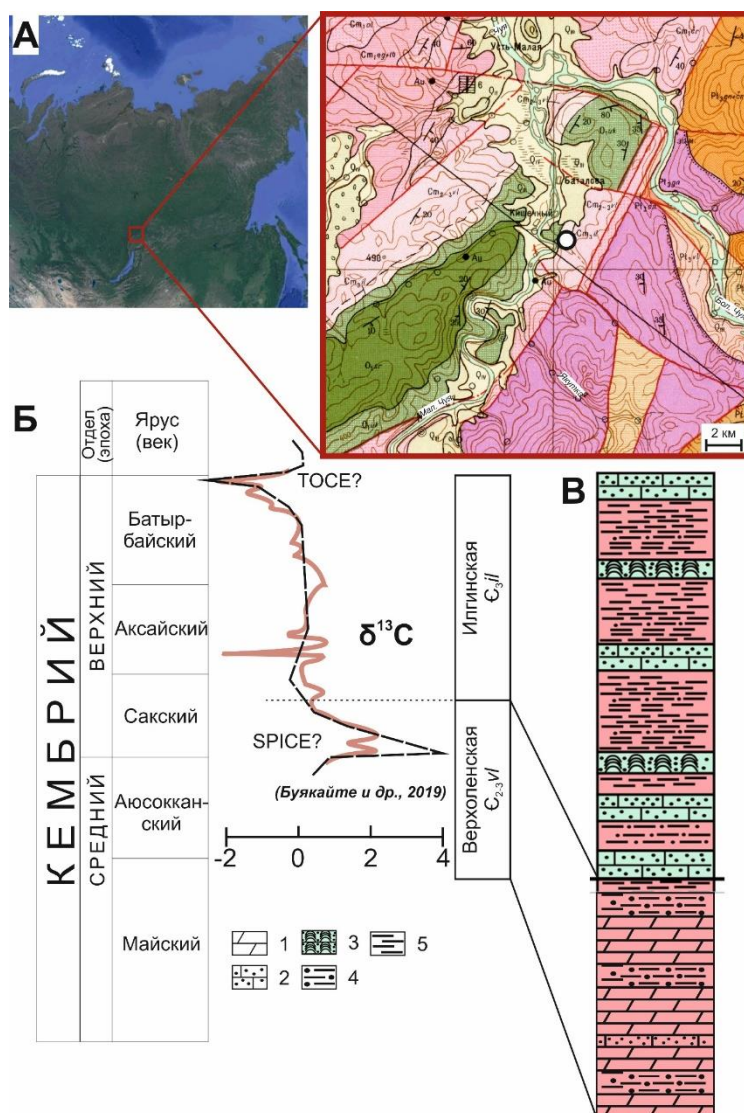
Палеоклиматические особенности формирования верхоленской серии изучались с 60-х гг. Н.М. Страховым (1962) верхоленская формация отнесена к типу лагунных. В лагунно-себховых условиях палеобассейн периодически распадался на отдельные более мелкие водоемы, где большую роль наряду с морской водой играл сток вод с суши, вносящий массы мелкого обломочного материала с горных обрамлений Иркутского амфитеатра (Жарков, 1965, Иванов, Воронова, 1972). Позднее, на основании данных по изотопному составу серы в сульфатах (Писарчик, Голубчина, 1979), а также пониженным по сравнению с одновозрастными отложениями других районов отношению  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в сульфатах и карбонатах (Виноградов и др., 2011) был подтвержден вывод о полной и быстрой изоляции Верхоленского бассейна.

### 5.2. Краткое описание разреза

Верхоленская серия изучена в разрезе на правом берегу реки Малая Чуя, в 7 км вверх по течению от ее слияния с рекой Большая Чуя (рис. 7). В обнажении вскрывается верхняя часть верхоленской серии, илгинская свита и нижняя часть устькутской свиты. В стратиграфической последовательности были опробованы 84.5 м разреза верхоленской серии. В изученном обнажении серия сложена доломитовыми мергелями, глинистыми алевролитами, красными, коричневатокрасными с маломощными прослоями зеленовато-серых алевролитов.

**Рис. 7.** Положение исследуемого разреза верхоленской серии (переходные отложения от верхнего кембрия к ордовика на правом берегу р. Малая Чуя). А – местоположение разреза в региональном плане, Б – стратиграфическое положение, В – строение разреза. Вариации изотопного состава углерода в карбонатах верхоленской и илгинской свит в разрезе р. Малая Чуя (по (Буякайте и др., 2019)).

Условные обозначения: 1 – доломитовый мергель, 2 – известковый песчаник, 3 – строматолитовые биогермы, 4 – алевролит, 5 – аргиллит

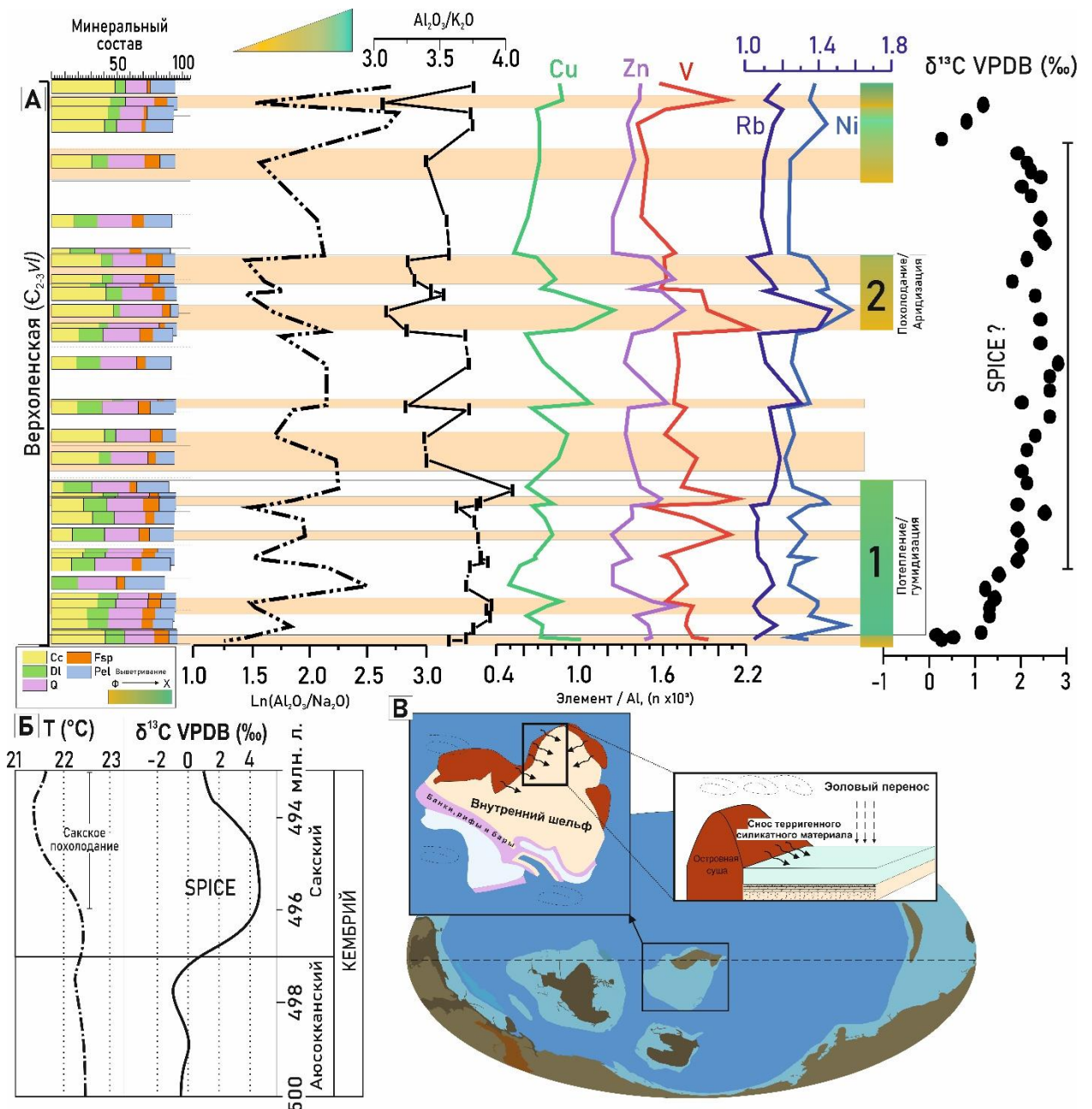


### 5.3. Геохимические особенности

Раздел содержит результаты определения главных петрогенных окислов и отдельных элементов. Для проанализированных пород характерно обогащение Cr (до 11 раз), V, Ni, Cu, Zn, Rb. Отдельные образцы обогащены Ba (до 26 раз) из-за присутствия барита.

### 5.4. Минеральный состав, его особенности и формы нахождения элементов

Приведена характеристика нормативного минерального состава, рассчитанного на основе главных петрогенных окислов (рис. 8), а также результаты SEM-исследований.



**Рис. 8.** Сводные палеогеографические данные для верхоленской серии. А – выделенные интервалы климатических изменений в разрезе р. Малая Чуя. Данные по  $\delta^{13}C$  предоставлены В.Э. Павловым, Б.Г. Покровским, М.И. Буякайте. Б – вариации климатических и изотопных событий в среднем-позднем кембрии по (Deng et al., 2023), температурная кривая (Scotese et al., 2021). В – схема поступления материала в исследуемую часть Верхоленского бассейна. Глобальная основа по (Scotese, 2014), региональная для Сибирской платформы по (Сухов и др., 2016).

### 5.5. Характеристика выветривания

По геохимическим данным отчетливо выделяются интервалы изменения характера выветривания в области денудации, фиксируемые по вариациям величин отношений  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Ln}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ , содержаний V, Cu, Zn, Rb, Ni (нормированных на Al), нормативного минерального состава. Важно упомянуть, что ранее в разрезе на р. Малая Чуя исследователями (Буякайте и др., 2019) установлен экскурс  $\delta^{13}\text{C}$  в верхней части верхоленской серии, который, возможно, соответствует изотопному событию SPICE (*Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion*), а также, в кровле согласно перекрывающей ее илгинской свиты, отрицательный экскурс, вероятно соответствующий событию TOCE, что позволяет отнести исследуемую часть разреза верхоленской серии к аюссоканскому-сакскому векам кембрия. Изученный в настоящей диссертации интервал разреза р. Малая Чуя, по-видимому, охватывает экскурс SPICE (рис. 8).

Выделенный в разрезе период интенсификации химического выветривания (рис. 8, интервал 1) с выносом элементов мог способствовать росту продуктивности в палеобассейне, повышению захоронения органического вещества и удалению с ним изотопа  $^{12}\text{C}$ , т.к. органическое вещество морского происхождения обогащено им, вызвав положительный экскурс  $\delta^{13}\text{C}$ . Интервал 2 с усилением физического выветривания, по-видимому, соответствует описанному в литературе Сакскому похолоданию («*Steptoean cool event*» по (Glumac, Walker, 1998; Saltzman et al., 2000; Deng et al., 2023))

**Третье защищаемое положение:** «В разрезе верхней части верхоленской серии, соответствующей аюссоканскому-сакскому векам, установлены крупные интервалы изменения характера выветривания в области денудации. Определены два таких интервала: 1) преимущественного усиления химического выветривания, связанный с потеплением или гумидизацией климата, 2) усиления физического выветривания за счет похолодания или аридизации».

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данного диссертационного исследования получены новые данные об условиях формирования иниканской свиты, гидрофизических и гидрохимических особенностях бассейна, проведены геохимические исследования пород из береговых обнажений р. Юдома. Уточнены палеогеографические условия образования пород эвенкийской свиты из обнажений р. Подкаменная Тунгуска близ острова Чёрный. Выполнена косвенная оценка климатических вариаций через процессы выветривания по данным геохимических исследований пород верхоленской серии из обнажений р. Малая Чуя.

В результате исследований установлено обогащение пород иниканской свиты редокс-чувствительными элементами и элементами способными к биоосаждению (V, Ni, Mo, Ag, Sb, U). Источником элементов (как вышеупомянутых, так и в целом) являлась морская вода, выщелачивающая их из эолового материала. Установлено, что отложения накапливались в преимущественно аноксических условиях с периодами возникновения как эвксинных, так и субоксических условий. Эти аноксические условия, вероятно, неоднократно могли прерываться краткими (сотни-тысячи лет) кислородными событиями. Развитие таких аноксических и эвксинных условий в придонном слое вызвано устойчивой стратификацией океана, существовавшей в ранне-среднекембрийское время в данной части бассейна с возможными эпизодами возникновения внутритермоклинных линз, нарушавших стратификацию и «запускавших» термохалинную циркуляцию до

определенных глубин. Представлена концептуальная модель стратификации и окислительно-восстановительных условий во время формирования иниканской свиты в данной части бассейна.

Установлено, что по условиям формирования к породам эвенкийской свиты р. Подкаменная Тунгуска наиболее близки литоральные образования в составе карбонатно-соленосной формации венда–нижнего кембрия Непско-Ботубинской антеклизы (Кузнецов, Сухы, 1990; Кузнецов и др., 2000; Кузнецов, Журавлева, 2019; Kuznetsov, Suchy, 1992). Выдвинуто предположение о принадлежности изученных фаций эвенкийской свиты преимущественно к обстановкам верхней литорали с возможными эпизодическими условиями нижней супралиторали под влиянием эвстатических колебаний в бассейне. Это условия приливно-отливных отмелей (возможно, микроприливные среды под влиянием преимущественно ветрового нагона), ассоциированных с прибрежными себхами.

В разрезе верхней части верхоленской серии в интервале изотопного события SPICE по геохимическим данным выделены интервалы изменения характера выветривания в области денудации: преимущественного усиления химического выветривания, связанный с потеплением или гумидизацией климата, и физического выветривания, которое усиливается за счет похолодания или аридизации.

### III. СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности**

#### **1.6.1 -Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика**

1. **Меренкова С.И., Калмыков Г.А., Габдуллин Р.Р., Карпова Е. В., Пузик А.Ю., Бадьянова И.В., Волкова М.А., Казымов К.П.** Условия формирования кремнистых пород нижнего-среднего кембрия юго-востока Сибирской платформы // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2022. № 6. С. 71—82. RSCI (1.27 п.л., вклад автора – 70%, импакт-фактор РИНЦ 0.38).
2. **Меренкова С.И., Коровников И.В., Габдуллин Р.Р.** Литолого-геохимические особенности и палеоклиматические условия формирования пород верхоленской серии // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2023. № 4. С. 20—30. RSCI (1.16 п.л., вклад автора – 80%, импакт-фактор РИНЦ 0.38).
3. **Меренкова С.И., Калмыков Г.А., Пузик А.Ю., Габдуллин Р.Р., Бадьянова И.В., Волкова М.А., Казымов К.П., Широян М.М.** Геохимические особенности пород иниканской свиты как индикаторы стратификации и гидрохимии вод палеобассейна // Геология и геофизика. 2024. Т. 65. №2. С. 265—287. RSCI (2.65 п.л., вклад автора – 80%, импакт-фактор РИНЦ 1.34).
4. **Меренкова С.И., Пузик А.Ю., Афонин И.В., Медведков А.А., Рабцевич Е.С., Габдуллин Р.Р., Пугач В.В.** Условия формирования пород эвенкийской свиты в долине нижнего течения р. Подкаменная Тунгуска, Сибирская платформа // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2024. № 1. С. 25—37. RSCI (1.5 п.л., вклад автора – 80%, импакт-фактор РИНЦ 0.38).

5. *Merenkova S.I., Mikheev I.V., Kalmykov G.A., Gabdullin R.R., Suslenkova M.M.* Application of sequential alkaline amorphous silica extraction for Cenozoic and Early Paleozoic rocks // Journal of Earth System Science. 2023. Vol. 132. №99. DOI: 10.1007/s12040-023-02113-1. Scopus (1.6 п.л., вклад автора – 70%, импакт-фактор SJR 0.48).

#### Иные научные публикации

6. *Меренкова С.И.* Актуальные проблемы изучения палеогеографии кембрия // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021» [Электронный ресурс] / Отв.ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. Электрон. текстовые дан. М.: МАКС Пресс, 2021. Режим доступа: [https://conf.msu.ru/archive/Lomonosov\\_2021/data/22046/123170\\_uid102962\\_report.pdf](https://conf.msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/22046/123170_uid102962_report.pdf).
7. *Меренкова С.И.* Влияние стратификации и гидрохимии вод палеобассейна Сибирской платформы на формирование инниканской свиты // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2023» [Электронный ресурс] / Отв.ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. Электрон. текстовые дан. М.: МАКС Пресс, 2023. Режим доступа: [https://Lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov\\_2023/data/28379/154655\\_uid102962\\_report.pdf](https://Lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2023/data/28379/154655_uid102962_report.pdf).
8. *Меренкова С.И., Калмыков Г.А., Габдуллин Р.Р., Пузик А.Ю.* Особенности стратификации и гидрохимии вод палеобассейна Сибирской платформы в раннем-среднем кембрии и их влияние на формирование инниканской свиты // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии: материалы XXXIII молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова, г. Апатиты, 3–7 октября 2022 г. Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2022. 260 с.
9. *Меренкова С.И., Калмыков Г.А., Габдуллин Р.Р., Карпова Е.В., Пузик А.Ю.* Источник кремнезема и особенности формирования кремнистых сланцев инниканской свиты (ранний-средний кембрий, сибирская платформа) // Понт Эвксинский - 2023: Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием для молодых ученых по проблемам водных и наземных экосистем, посвященной 60-летию со дня преобразования Севастопольской биологической станции в ИнБЮМ, Севастополь, 09–14 октября 2023 года. Севастополь: ФИЦ "Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН", 2023. С. 72-73.