

**EVENT STRATIGRAPHY AND CORRELATION PROBLEMS OF THE ORDOVICIAN STRATA OF GORNY ALTAI AND SALAIR****N.V. Sennikov**  , **O.T. Obut, E.V. Lykova, A.V. Timokhin, R.A. Khabibulina, T.A. Shcherbanenko**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

**ABSTRACT.** Study of the Ordovician sedimentary sequences of Gorny Altai and Salair has revealed lithological and paleontological features correlating with global sedimentary events:

- (1) The Acerocare Regressive Event (an initial event in the Early Tremadocian);
- (2) Black Mountain Transgressive Event (Early Tremadocian);
- (3) Peltocare Regressive Event (Tremadocian);
- (4) Kelly Creek Regressive Event (Late Tremadocian);
- (5) Ceratopyge Regressive Event (Late Tremadocian);
- (6) Billingen Transgressive Event (Early Floian);
- (7) Stein Lowstand Event (Middle Darriwilian);
- (8) Vollen Lowstand Event (Sandbian);
- (9) Arestad Drowning Event (Middle Sandbian);
- (10) Frognerkilen Lowstand Event (Early Katian);
- (11) Linearis Drowning Events 1 and 2 (Middle Katian);
- (12) Terminal Husbergoya Lowstand Event (Hirnantian); and
- (13) Hirnantian Lowstand Event (HICE) (Late Ordovician).

The chronostratigraphic levels with traces of the global sedimentary events in the Uymen-Lebed structural-facies zone (SFZ) (Gorny Altai) differ from those in the Charysh-Inya and Anui-Chuya SFZ (Altai). In the Ordovician, the Altai basin located in the Charysh-Inya and Anui-Chuya SFZ was a marine area separated from both the Uymen-Lebed basin and the coeval Salair basin. The traces of the global sedimentary and/or biotic events in the Altai and Salair sections can be used as a precise basis for direct correlation of the local stratigraphic units with the units of the International Stratigraphic Chart.

**KEYWORDS:** event stratigraphy; sedimentary event; Ordovician; Gorny Altai; Salair

**RESEARCH ARTICLE**

Received: May 26, 2020

Revised: July 13, 2020

Accepted: July 14, 2020

**Correspondence:** Nikolay V. Sennikov, [SennikovNV@ipgg.sbras.ru](mailto:SennikovNV@ipgg.sbras.ru)

**FOR CITATION:** Sennikov N.V., Obut O.T., Lykova E.V., Timokhin A.V., Khabibulina R.A., Shcherbanenko T.A., 2021. Event stratigraphy and correlation problems of the Ordovician strata of Gorny Altai and Salair. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (2), 246–260. doi:10.5800/GT-2021-12-2-0523

## СОБЫТИЙНАЯ СТРАТИГРАФИЯ И ПРОБЛЕМЫ КОРРЕЛЯЦИИ ОРДОВИКСКИХ СТРАТОНОВ ГОРНОГО АЛТАЯ И САЛАИРА

Н.В. Сенников, О.Т. Обут, Е.В. Лыкова, А.В. Тимохин, Р.А. Хабибулина, Т.А. Щербаненко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

**АННОТАЦИЯ.** В ордовикских осадочных последовательностях Горного Алтая и Салаира выделены литологические и палеонтологические особенности, которые коррелируются с глобальными седиментационными событиями:

- 1) инициальным раннетремадокским регрессивным Ацерокаре (Acerocare),
- 2) раннетремадокским трансгрессивным Блэк Маунтин (Black Mountain),
- 3) тремадокским регрессивным Пельтокаре (Peltocare),
- 4) позднеотремадокским регрессивным Келли Крик (Kelly Creek),
- 5) позднеотремадокским регрессивным Цератописе (Ceratomyge),
- 6) раннефлоским трансгрессивным Биллинген (Billingen),
- 7) среднедарривильским регрессивным Стейн (Stein),
- 8) раннесандбийским регрессивным Воллен (Vollen Lowstand),
- 9) среднесанбийским трансгрессивным Аристад (Arestad),
- 10) раннекатийским регрессивным Фрогнеркилен (Frognerkilen),
- 11) среднекатийским регрессивным Линеарис (Linearis),
- 12) хирнантским регрессивным – Терминальный Хусбергоя (Terminal Husbergoya),
- 13) позднеордовикским регрессивным Хирнант (Hirnantian Lowstand) (HICE).

Хроностратиграфические уровни проявления следов глобальных седиментационных событий в Уйменско-Лебедской структурно-фациальной зоне (СФЗ) Горного Алтая отличаются от уровней проявления следов глобальных седиментационных событий в Чарышско-Инской и Ануйско-Чуйской СФЗ Алтая. Алтайский ордовикский бассейн, располагавшийся в Чарышско-Инской и Ануйско-Чуйской СФЗ, был морской акваторией, обособленной как от Уйменско-Лебедского, так и от Салаирского одновозрастного бассейна.

Зафиксированные в алтайских и салаирских разрезах следы глобальных седиментационных и (или) биотических событий могут служить прецизионной основой для прямой корреляции местных стратиграфических подразделений с ярусными подразделениями Международной стратиграфической шкалы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** событийная стратиграфия; седиментационное событие; ордовик; Горный Алтай; Салаир

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Событийная стратиграфия – один из последних новых современных стратиграфических методов, введенных в геологическую практику немецким профессором О.Г. Валлизером [Walliser, 1996], который включает анализ взаимосвязей глобальных абиотических и биотических событий и проявлений седиментационных событий («следов») в конкретных разрезах различных геологических регионов. Сначала О.Г. Валлизером была продемонстрирована возможность использования инструмента анализа только биотических событий и кризисов (включая массовые вымирания) [Walliser, 1986], показавшая высокую перспективность хроностратиграфической интерпретации резких изменений таксономического состава фаунистических и флористических комплексов, так называемых переломных рубежей в истории развития биосферы. Синтез данных по абиотическим параметрам палеобассейнов осадконакопления с параметрами развивавшихся в них палеобиот позволил создать новый комплексный мультидисциплинарный метод в стратиграфии – событийный.

Российские геологи активно подключились к внедрению событийного метода в стратиграфические

исследования. Были подготовлены специальные пособия [Dronov et al., 1998; Zhamoyda, 2000; Koren', 2000]. Однако, хотя в рамках событийной стратиграфии используются различные современные геологические дисциплины, что делает ее актуальной и востребованной, пока сам метод не получил в России широкого применения в региональных исследованиях. Следует по возможности максимально расширить использование метода событийной стратиграфии для комплексирования сведений по всем геологическим дисциплинам, затрагивающим различные аспекты истории развития крупных седиментационных палеобассейнов. Изложенный в настоящей статье материал иллюстрирует эти возможности применения метода событийной стратиграфии для решения региональных задач.

### 2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ СОБЫТИЙНОЙ СТРАТИГРАФИИ

Глобальное событие – это абиотическое («седиментационное») или биотическое событие, проявляющееся синхронно на разных палеоконтинентах в сравнимых обстановках и палеогеографических ситуациях и прослеживаемое в пределах одного зонального или

инфразонального подразделения по ортостратиграфическим группам фауны (то есть в интервале менее 1 млн лет, часто 0.2–0.5 млн лет). Под седиментационным событием понимается кратковременное (по геологическим меркам), нередко катастрофическое прекращение непрерывности процесса осадконакопления, временной интервал которого значительно короче предшествующего и последующего периодов медленных изменений хода такого процесса.

Биотическое событие часто понимается только как биотический кризис (событие массового вымирания), без учета посткризисного состояния палеобиот и их последующих инноваций и диверсификаций. Вымирание таксонов организмов – непрерывный, постоянно идущий на протяжении всей эволюции биосферы процесс. На этом фоне происходят кратковременные биотические события вымираний, когда наблюдается так называемое массовое вымирание – исчезновение таксонов высокого ранга в разных группах организмов. Фоновое вымирание – исчезновение таксонов в процессе эволюции, не влияющее на общее разнообразие таксонов и всей биоты в целом. В отличие от фонового, массовое вымирание – событие внезапного (нередко катастрофического) исчезновения таксонов разнообразных филогенетических линий развития организмов, принадлежащих разным экологическим группам, при резком снижении общего таксономического разнообразия и общей биомассы.

Первый этап биотического события – внезапный, кратковременный количественный и качественный скачок снижения биоразнообразия на фоне постоянно идущих трансформаций видового и родового разнообразия палеобиот. Такие снижения таксономического биоразнообразия в реальных разрезах конкретных регионов, как правило, некорректно трактуются как «недостатки» полноты геологической летописи. А именно такие феномены и являются, при доказанности их глобальности, уникальным инструментом для прямых межрегиональных и глобальных корреляций.

Объектами событийной стратиграфии являются феномены уникальных (нестандартных) литологических и палеобиологических объектов или их сочетаний, синхронно фиксирующихся в геологической летописи в различных регионах и на разных континентах. Они являются следствием ответной реакции процессов седиментации и элементов биосферы на кратковременные масштабные изменения непрерывного хода взаимосвязанных и взаимозависимых процессов, происходящих в геосфере, – климат, эвстатические колебания уровня Мирового океана, изменения содержания изотопов различных химических элементов, солености морской воды и океанической циркуляции, вулканизм и т.д.

Причинно-следственные связи глобальных «абиотических» событий требуют глубокого всестороннего изучения. Выявление господствующих процессов при глобальных абиотических (седиментационных) событиях объективно затруднено вследствие произошедших постоянных воздействий («совмещение – наложение»)

на природу всех местных геологических объектов самых различных региональных процессов. Такая региональная доминанта нередко практически «затушевывает» картину проявления трендов глобального абиотического (седиментационного) события на конкретных разрезах.

В том случае, когда литологические свидетельства одновременно произошедшего седиментационного события установлены в одной или двух – трех соседствующих друг с другом частях геологических регионов, такие события классифицируют как «региональные», отражающие рубежи типов осадконакопления в конкретном палеобассейне. Пока при исследованиях по палеозою сибирских регионов не получила необходимого развития практика следующего этапа – анализа (включая и экспертную оценку), является ли такое событие исключительно региональным или его следует «увязывать» с каким-то глобальным событием, характеризующим эвстатику уровня Мирового океана.

Динамика флуктуаций уровня Мирового океана (масштабные трансгрессии и регрессии, приводящие к глобальным седиментационным событиям) в настоящее время для ордовикского, силурийского и девонского стратиграфических интервалов установлена достаточно точно с применением шкал зональных подразделений по граптолитам или конодонтам. Основная задача при проведении региональных исследований состоит не в том, чтобы на качественном уровне только экспертным путем оценивать региональный или глобальный масштаб следов каких-либо седиментационных событий. Необходимо создание полных региональных последовательностей зональных шкал по отмеченным ортостратиграфическим группам и, на их базе, зональное (и инфразональное) датирование в каждом конкретном разрезе выявляемых седиментационных событий. Таким образом можно установить совпадение (или отличие) возраста (с точностью до части биостратиграфической зоны) выявленного седиментационного события в исследуемом регионе с хроностратиграфическим уровнем проявления уже известного глобального абиотического события. При совпадении возрастной зональной датировки следов седиментационного события в регионе с уровнем глобального абиотического события возникает инструмент межконтинентального трассирования этого рубежа.

Большинство специалистов соглашаются с тем, что именно глобальные седиментационные события выступают триггерами биотических событий – вымираний, диверсификаций и инноваций [Walliser, 1986, 1996]. В последние годы предполагается, что время расцвета послекризисных биодиверсификаций (не только в разных группах, но и в одной и той же группе фауны) на разных палеоконтинентах могло не совпадать [Servais, Harper, 2018; Harper et al., 2020; Dronov, 2020]. Это объясняется тем, что на скорость выхода палеобиот из таких кризисных ситуаций существенное влияние оказывали региональные события. С одной стороны, региональные седиментационные события играют роль

ускорителей процессов преобразования экологических систем (стимул фаунистических инноваций), а с другой – «внешнего контролера», постоянно испытывающего устойчивость формирующихся биоценозов. В связи с этим крайне важны не только поиск и выявление глобальных седиментационных событий в истории конкретного палеобассейна, но и изучение стратиграфически соседствующих с ними региональных седиментационных событий с точно установленным (на зональной или инфразональной основе) более молодым или более древним возрастом.

Событийная стратиграфия на современном этапе включает использование взаимодополнения и взаимоконтроля изучаемых глобальных седиментационных и биотических событий. При этом флуктуации глобальных абиотических событий неизменно рассматриваются на фоне проявлений региональных событий.

### 3. ОРДОВИКСКИЕ ГЛОБАЛЬНЫЕ СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ И БИОТИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ

В настоящее время нет официально общепринятой последовательности глобальных седиментационных событий ордовикского периода. До сих пор происходит коррекция списка таких событий. С одной стороны, новейшими биостратиграфическими исследованиями доказывается одновозрастность пар или триад седиментационных событий, ранее выделенных по материалам различных континентов (сокращение за счет объединения в одно событие), а с другой – выделяются новые седиментационные события, реальную глобальность которых еще требуется проверять на материалах различных геологических регионов. В настоящей работе используется последовательность ордовикских седиментационных событий, рассматриваемых в следующих работах [Miller, 1984; Erdtmann, 1984, 1986; Nicoll et al., 1992; Nielsen, 2003, 2004, 2011; Munnecke et al., 2010; Vintaned, Schmitz, 2011; Gradstein et al., 2012].

Одно из крупнейших в фанерозое глобальных вымираний – общепризнанное биотическое событие, произошло в конце ордовика. Оно уже много лет связывается с глобальным катастрофическим изменением климата, с масштабным терминальным ордовикским оледенением Гондваны (современная Южная Америка и Африка), где известны многочисленные тиллиты и ледниковые долины [Brenchley, 1988, 2004; Brenchley et al., 1991; Aceñolaza, 2002; Moreau et al., 2005; McDougall, Gruenwald, 2011]. Во многих регионах мира хирнантское глобальное похолодание фиксируется в виде специфических литологических проявлений (темпеститы, диамиктиты и др.) и геохимических аномалий, в том числе изотопов углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) [Underwood et al., 1997; Bergstrom et al., 2006; Chen et al., 2006; Kaljo, Martma, 2011; Meidla et al., 2011; Mitchell et al., 2011; Schonlaub et al., 2011; Mauviel et al., 2020]. Интересно отметить, что по последним данным [Ling et al., 2019] продолжительность этого терминального ордовикского оледенения была не более 0.2 млн лет. Таким образом, фиксация

этого седиментационного события позволяет, применяя метод событийной стратиграфии, датировать слои в исследуемых разрезах с точностью, достигающей максимальной степени разрешения зонального биостратиграфического метода.

В западной части Алтае-Саянской складчатой области тиллиты не обнаружены. Литологические следы проявления глобального седиментационного хирнантского события фиксируются в Уйменско-Лебедской структурно-фациальной зоне (СФЗ) (рис. 1) Горного Алтая в виде диамиктитов, представленных слоями хаотично располагающихся неокатанных обломков кремней в красноцветных алевролитах и алевропесчаниках низов чеборской свиты, биостратиграфически сопоставляемой с хирнантским ярусом [Sennikov et al., 2019]. В Чарышско-Инской СФЗ Алтая в самых верхах техтенской свиты, охватывающей поздний катий и ранний хирнант, в слоистых известняках зафиксировано событие крупного хирнантского изотопного сдвига ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ) (НICE) [Sennikov et al., 2015a].

В ордовике, кроме НICE, в верхнем отделе системы зафиксирован меньший по масштабу изотопный экскурс ( $\delta^{13}\text{C}$ ) – Гуттенберг (Guttenberg carbon isotope excursion – GICE) [Calner, 2008]. На Алтае и Салаире специализированные геохимические работы по выявлению этой аномалии пока не проводились.

В последние годы появились сведения о других глобальных биотических событиях масштабных вымираний и биодиверсификаций в ордовикском периоде, для которых триггерами являлись седиментационные события, отражающие глобальные похолодания (до оледенений). До недавнего времени глобальные изменения климата в ордовике (за исключением хирнантского (см. выше)) связывали главным образом с активизацией вулканической деятельности и повышением количества пепла и пыли в атмосфере [Trotter et al., 2008]. Также к процессам, способным привести к глобальным климатическим изменениям, относили смены глобальной океанической циркуляции при изменении взаиморасположения континентальных блоков [Rasmussen et al., 2016]. В последнее десятилетие ряд исследователей одно из таких предполагаемых похолоданий связывает с резким увеличением поступления на Землю количества космической пыли и метеоритов при разрушении крупного космического тела внутри Солнечной системы 466 млн лет назад [Heck et al., 2016; Martin et al., 2018; Dronov, 2020].

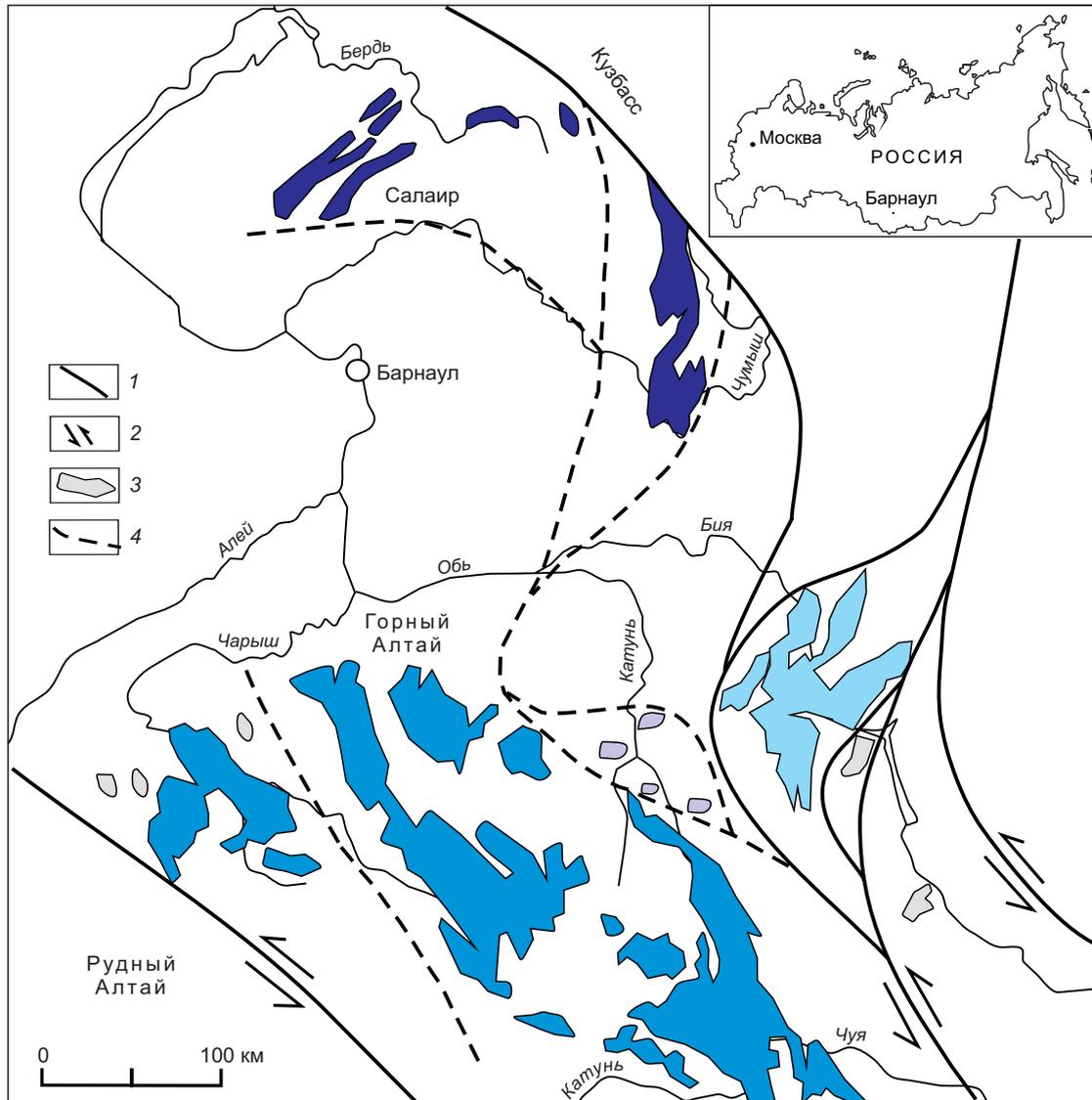
### 4. РОЛЬ СОБЫТИЙНОГО МЕТОДА В РЕГИОНАЛЬНОЙ СТРАТИГРАФИИ

При изучении строения и истории развития нижнепалеозойских седиментационных бассейнов, согласно Стратиграфическому кодексу России [Zhamoyda, 2019], традиционно используют региональные стратиграфические подразделения – горизонты. Горизонты по своей сути являются «картиной» определенных этапов «...геологической истории крупного участка земной коры и отражают особенности осадконакопления и

последовательность смены комплексов фаун и флор, населявших данный участок [Zhamoyda, 2019, статья IV.1]». Критические рубежи смены одного геологического этапа на другой выделяются в качестве границ региональных стратонов. В идеальном случае можно было ожидать проявления глобальных седиментационных и (или) биотических событий на границах региональных стратонов. Но такой сценарий мог бы произойти только в стабильно развивающемся, медленно прогибающемся седиментационном палеобассейне. Реальная наблюдаемая картина представляет собой

наложение глобальных седиментационных событий и региональной составляющей динамики самого палеобассейна. Такой региональный вектор может усилить или нейтрализовать воздействие глобальных абиотических событий в каждом конкретном палеобассейне.

Горизонты, по Стратиграфическому кодексу России [Zhamoyda, 2019], служат для корреляции местных геологических тел (свит и серий) и способствуют сопоставлению последовательности этих стратонов в стратиграфических схемах с ярусными подразделениями Общей (Международной) стратиграфической шкалы.



**Рис. 1.** Схема полей выходов ордовикских отложений на Горном Алтае и Салаире. 1 – глубинные разломы, ограничения крупнейших региональных блоков; 2 – зоны главных сдвигов; 3 – площади распространения ордовикских отложений; 4 – границы структурно-фациальных зон. Синий фон – Чарышско-Инская и Ануйско-Чуйская СФЗ Горного Алтая; сиреневый фон – Бийско-Катунская СФЗ Горного Алтая; голубой фон – Уйменско-Лебедская СФЗ Горного Алтая; темно синий фон – Бердско-Хмельёвская и Гурьевско-Ельцовская СФЗ Салаира; серый фон – мелкомасштабные выходы.

**Fig.1.** Sketch map for the Ordovician strata of Gornyy Altay and Salair. 1 – deep faults between large regional blocks; 2 – major shear zones; 3 – Ordovician sedimentation areas; 4 – boundaries of structural-facies zones. Colour codes: blue – Charysh-Inya and Anui-Chuya SFZ (Gornyy Altay); lilac – Biysk-Katun SFZ (Gornyy Altay); light blue – Uymen-Lebed SFZ (Gornyy Altay); dark blue – Berdsk-Khmelevka and Gurievsk-Eltsovska SFZ (Salair); gray – small outcrops.

Так как, согласно Стратиграфическому кодексу [Zha-moyda, 2019], географическое распространение региональных стратонов ограничивается палеобассейном седиментации, использование горизонтов для реконструкций истории развития крупных участков земной коры с различными палеобассейнами невозможно. В таких реконструкциях незаменимым инструментом становится методика событийной стратиграфии.

Зафиксированные в разрезах отдельных регионов глобальные седиментационные и (или) биотические события могут без использования региональных стратонов (горизонтов) служить прецизионной основой для прямой корреляции местных стратиграфических подразделений с ярусными подразделениями Общей (и Международной) стратиграфической шкалы.

Выявленная последовательность глобальных седиментационных и (или) биотических событий обладает принципом самодостаточности для глобальных реконструкций геологической истории древних бассейнов седиментации. Из других стратиграфических методов такую самодостаточность имеет только метод зональной стратиграфии по ортостратиграфическим группам фауны. Однако особо стоит отметить, что «глобальность» события устанавливается на биостратиграфической основе с применением метода зональной стратиграфии, то есть биостратиграфия и в этом случае имеет приоритетное право, являясь исходной «точной отсчета».

В последние годы наблюдается отчетливая тенденция направленного поиска и изучения феноменов глобальных седиментационных и (или) биотических событий в палеобассейнах различного генезиса и масштаба. Широкое международное сотрудничество постепенно приводит к «интернационализации» зональных понятий и «сглаживанию» «провинциальной специфики» зональных шкал. Это позволяет уверенно датировать с точностью до зоны (и части зоны) выявляемые в регионах седиментационные события и производить экспертную оценку их «глобальной» или «региональной» природы.

## 5. ХРОНОЛОГИЯ АЛТАЙСКИХ И САЛАИРСКИХ ОРДОВИКСКИХ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ СОБЫТИЙ

Основой для проведения исследований по событийной стратиграфии ордовика Горного Алтая и Салаира послужили созданные параллельные зональные шкалы по граптолитам, конодонтам и хитинозоям [Sennikov, 1996; Sennikov, Obut, 2002; Sennikov et al., 2014, 2015b]. Дополнительными предпосылками для рассмотрения всего стратиграфического интервала ордовика Горного Алтая и Салаира явились два обстоятельства. Первое – при подготовке двух международных стратиграфических симпозиумов по палеозою юга Сибири были детально изучены и послойно описаны многочисленные ключевые разрезы ордовика и силура Горного Алтая [Sennikov et al., 2008, 2019]. Второе обстоятельство – был закончен многолетний этап коллективной подготовки нового поколения Региональной стратиграфической

схемы ордовикских отложений западной части Алтае-Саянской складчатой области [Sennikov et al., 2018].

Максимально широкое использование принципов событийной стратиграфии при изучении нижнепалеозойских бассейнов седиментации в западной части Алтае-Саянской складчатой области [Sennikov, 1998; Sennikov et al., 2010, 2011, 2013, 2014, 2015a, 2019] позволило выявить в опорных разрезах многие из известных глобальных событий, произошедших в ордовикском периоде [Erdtmann, 1984, 1986; Miller, 1984; Brenchley, 1988, 2004; Brenchley et al., 1991; Nicoll et al., 1992; Underwood et al., 1997; Aceñolaza, 2002; Nielsen, 2003, 2004, 2011; Moreau et al., 2005; Bergstrom et al., 2006; Chen et al., 2006; Munnecke et al., 2010; Kaljo, Martma, 2011; McDougall, Gruenwald, 2011; Meidla et al., 2011; Mitchell et al., 2011; Schonlaub et al., 2011; Vintaned, Schmitz, 2011; Gradstein et al., 2012; Mauviel et al., 2020].

Рассмотрим некоторые примеры ярко проявленных седиментационных событий в ордовикских осадочных последовательностях Горного Алтая и Салаира (рис. 2).

В разрезе камлакской свиты в Бийско-Катунской СФЗ Горного Алтая среди конгломератов, пестроцветных песчаников и алевролитов с линзами пестроцветных, реже сероцветных известняков внезапно появляются и так же быстро исчезают черные глинистые аргиллиты (рис. 3, а). Они могут быть отнесены к «следам» проявления глобального раннетремадокского трансгрессивного события Блэк Маунтин (Black Mountain). Геологические доказательства: а) хроностратиграфическое положение и б) сходство алтайского литологического проявления следов события с типовым проявлением Блэк Маунтин (Black Mountain) в Австралии [Miller, 1984].

Основание пачки несортированных крупнозернистых песчаников среди карбонатов ишпинской свиты (рис. 3, б) можно считать «следами» проявления глобального регрессивного события Пельтокаре (Peltocare) [Erdtmann, 1986]. Геологическое доказательство: хроностратиграфическое положение.

Базальные конгломераты верхнекамлакской подсвиты Бийско-Катунской СФЗ Горного Алтая могут быть интерпретированы как «следы» проявления глобального среднетремадокского регрессивного события Келли Крик (Kelly Creek) [Nicoll et al., 1992]. Геологическое доказательство: хроностратиграфическое положение.

Базальные конгломераты тулойской свиты (рис. 3, в) в Уйменско-Лебедской СФЗ на Горном Алтае ранее нами [Sennikov et al., 2019] относились к «следам» проявления глобального раннефлоского (раннеаренигского) трансгрессивного события Биллинген (Billingen) [Nielsen, 2004; Vintaned, Schmitz, 2011]. В настоящее время представляется более доказательным отнести, с некоторой долей условности, эти грубообломочные образования к последствиям глобального поздне-тремадокского регрессивного события Цератописе (Ceratopyge) [Erdtmann, 1986; Nielsen, 2004, 2011; Vintaned, Schmitz,



2011]. Стоит учесть, что некоторые исследователи [Vintaned, Schmitz, 2011] предполагали проявление в верхнем тремадоке, в интервале между регрессивным событием Цератописе (Ceratorupe) и трансгрессивным событием Биллинген (Billingen), других менее масштабных глобальных седиментационных событий – Хага-странд (Hagastrand) и Копиосус (Copiosus).

Залегающие над базальными конгломератами тулойской свиты в Уйменско-Лебедской СФЗ черные относительно глубоководные, граптолитовые аргиллиты могут быть проявлением раннефлоского (раннеаренигского) трансгрессивного события Биллинген (Billingen). Геологическое доказательство: а) хроностратиграфическое положение с точностью зональной стратиграфии, б) литологическая характеристика.

Нижнюю границу воскресенской свиты с базальными конгломератами и угловым несогласием в основании в Чарышско-Инской и Ануйско-Чуйской СФЗ на Горном Алтае нельзя рассматривать как «следы» проявления глобального раннефлоского (раннеаренигского) трансгрессивного события Биллинген (Billingen). Вероятнее всего, это следствие более позднего регионального седиментационного события, связанного с масштабным опусканием (прогибанием) западной части территории региона, сопровождавшегося переходом от режима континентального разрушения и выветривания к режиму морского осадконакопления.

Базальные конгломераты и гравелиты иловатской свиты в Гурьевско-Ельцовской СФЗ Салаира можно трактовать как «следы» проявления глобального раннефлоского (раннеаренигского) трансгрессивного события Биллинген (Billingen) или следствие более позднего регионального седиментационного события опускания (прогибания).

Ранее [Sennikov et al., 2017] доминирующей причиной формирования базальных крупнозернистых песчаников подводно-баровой природы карасинской свиты Горного Алтая считалось глобальное регрессивное событие Стейн (Stein) [Nielsen, 2004]. В настоящее время по подразделениям зональной граптолитовой шкалы представляется более вероятным связывать такое явление масштабного обмеления палеобассейна, существовавшего в Уйменско-Лебедской СФЗ Алтая, с региональным подъемом дна палеобассейна.

Границу изыракской и зайчихинской свит – конгломераты в основании зайчихинского стратона, вероятно, можно относить к «следам» проявления глобального регрессивного события Стейн (Stein) в ордовике Бердско-Хмелевской СФЗ Салаира. Геологическое доказательство: хроностратиграфическое положение с точностью зональной стратиграфии.

Базальные конгломераты в основании бугрышинской свиты (рис. 3, г) относятся к проявлению регионального седиментационного события для ордовика Чарышско-Инской и Ануйско-Чуйской СФЗ Горного Алтая. В то же время нельзя исключить, что причиной формирования этих грубообломочных пород явилось воздействие глобального регрессивного события

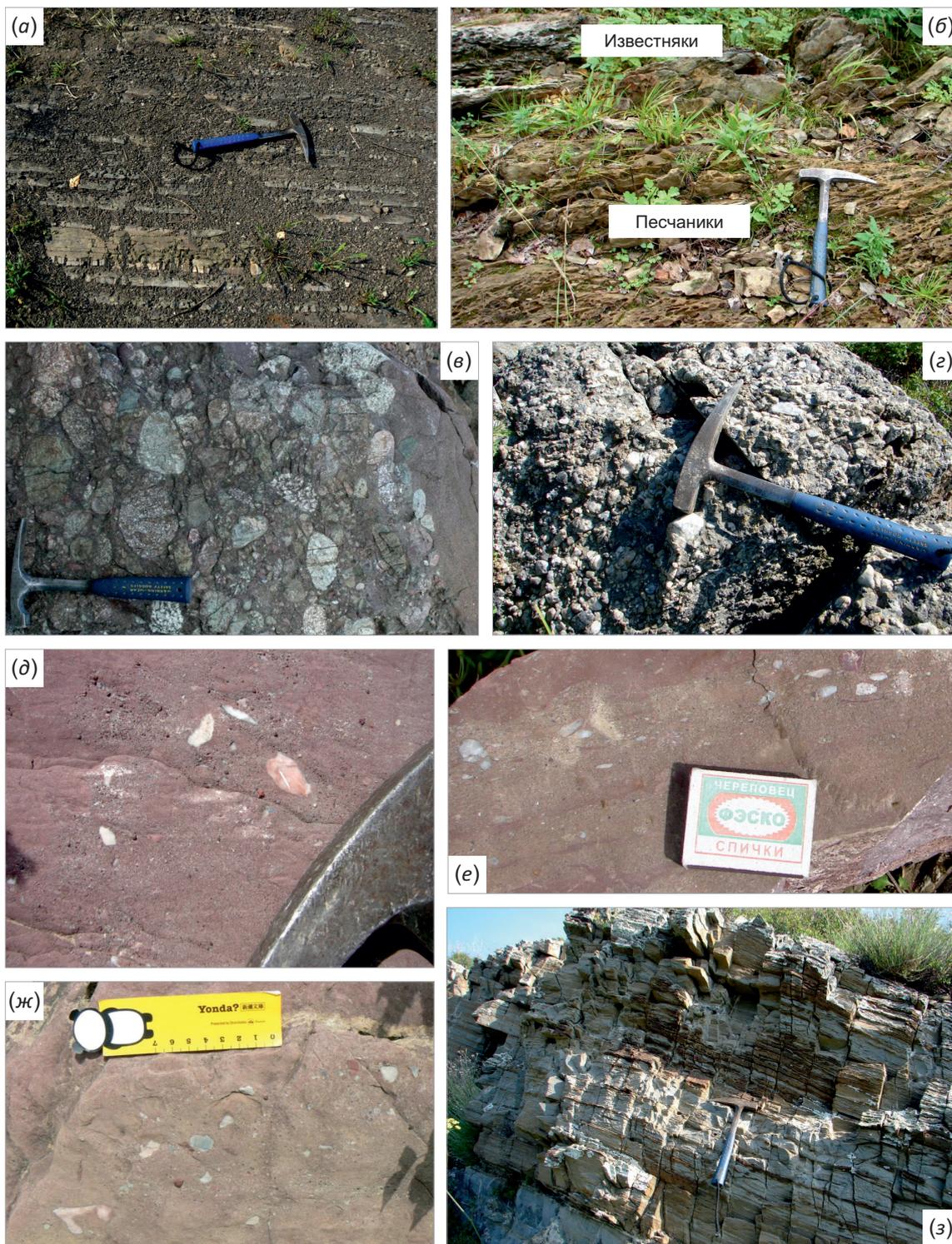
Стейн (Stein). Косвенным подтверждением воздействия глобальных процессов при образовании базальных конгломератов бугрышинской свиты является отсутствие угловых и азимутальных несогласий в основании этой свиты.

Внезапное появление в разрезе грубообломочной (конгломераты, гравелиты, песчаники с плавающим гравием) базальной пачки гурьяновской свиты в Уйменско-Лебедской СФЗ Горного Алтая следует интерпретировать как «следы» проявления глобального раннеаренигского регрессивного события Воллен (Vollen Lowstand) [Nielsen, 2004]. Геологическое доказательство: хроностратиграфическое положение. Если принять это как аргументированное обстоятельство, то необходимо уточнить положение нижней границы гурьяновской свиты до середины граптолитовой зоны *N. gracilis*. Официально нижняя граница гурьяновской свиты принимается на уровне основания этой граптолитовой зоны [Sennikov et al., 2018].

Базальные конгломераты веберовской свиты ордовика Гурьевско-Ельцовской СФЗ Салаира могут быть «следами» регионального седиментационного события. В то же время нельзя исключить вероятность воздействия глобального раннеаренигского регрессивного события Фрогнеркилен (Frognerkilen) [Nielsen, 2004, 2011].

Резкая смена сероцветных карбонатных и тонкотерригенных осадков верхов гурьяновской свиты в Уйменско-Лебедской СФЗ Горного Алтая на вышележащие красноцветные, груботерригенные (песчаники и гравелиты), экстремально мелководные породы чеборской свиты может быть отнесена к «следам» проявления глобального позднеордовикского регрессивного события (с максимальным масштабом при позднеордовикском оледенении) Хирнант (Hirnantian Lowstand). Геологические доказательства: а) хроностратиграфическое положение, б) литологическое проявление в виде диамиктитов (рис. 3, д–ж). Необходимо отметить, что следует рассмотреть вопрос о возможности проявления диамиктитов в чеборской свите под влиянием более раннего глобального регрессивного события – Терминальный Хусбергоя (Terminal Husbergoya) [Nielsen, 2004, 2011].

По изотопам углерода в образцах известняков верхов техтенской свиты (рис. 3, з) в Чарышско-Инской СФЗ Горного Алтая установлен четко выраженный положительный экскурс изотопа углерода ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ), который является «следом» проявления глобального регрессивного события Хирнант (Hirnantian Lowstand) со специфическим наименованием «Хирнантский углеродный изотопный сдвиг» («Hirnantian isotopic carbon excursion» – HICE) [Underwood et al., 1997; Bergstrom et al., 2006; Chen et al., 2006; Kaljo, Martma, 2011; Meidla et al., 2011; Mitchell et al., 2011; Schonlaub et al., 2011; Mauviel et al., 2020]. Геологические доказательства: а) хроностратиграфическое положение с точностью зональной стратиграфии, б) литологическое проявление, в) изотопно-геохимические данные.



**Рис. 3.** Примеры проявления глобальных седиментационных событий в алтайских ордовикских осадочных последовательностях.

(а) – черные аргиллиты средней части камлакской свиты – феномен проявления раннетремадокского трансгрессивного события Блэк Маунтин (Black Mountain) в Бийско-Катунской СФЗ (разрез Камлак); (б) – несортированные, крупнозернистые песчаники средней части ишпинской свиты – феномен проявления тремадокского регрессивного события Пельтокаре (Peltocare) в Уйменско-Лебедской СФЗ (разрез Перевал); (в) – базальные конгломераты тулойской свиты – феномен проявления регрессивного события Цератописе (Ceratorupe) в Уйменско-Лебедской СФЗ (разрез Тулой); (г) – среднесортированные, хорошо окатанные конгломераты базальной пачки бугрышихинской свиты – феномен проявления глобального среднедарривильского регрессивного события Стейн (Stein) в Чарышко-Инской СФЗ (разрез Воскресенка-1); (д–ж) – угловатые неокатанные обломки гравийно-галечной размерности в алевролит-аргиллитах базальной пачки чеборской свиты диамиктитовой природы – феномен проявления хирнантского регрессивного события Терминальный Хусбергоя (Terminal Husbergoya) в Уйменско-Лебедской СФЗ (разрез Лебедь); (з) – известняки дальманитиновой пачки тектенской свиты с изотопным сдвигом ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ )

равным 6 ‰) (HICE) – феномен проявления позднеордовикского регрессивного события Хирнант (Hirnantian Lowstand) (HICE) в Чарышско-Инской СФЗ (разрез Буровлянка).

**Fig. 3.** Traces of global sedimentation events in the Ordovician Altai sedimentary sequences.

(a) – black argillites in the middle part of the Kamlak Formation – appearance of the Black Mountain Transgressive Event (early Tremadocian) in the Biysk-Katun SFZ (Kamlak section); (б) – mixed coarse-grained sandstones of the middle part of the Ishpa Formation – appearance of the Peltocare Regressive Event (Tremadocian) in the Uymen-Lebed SFZ (Pereval section); (в) – basal conglomerates of the Tuloi Formation – appearance of the Ceratopyge Regressive Event in the Uymen-Lebed SFZ (Tuloi section); (г) – medium-sorted, well-rounded conglomerates of the basal member of the Bugryshikha Formation – appearance of the Stein Lowstand Event (middle Darriwilian) in the Charysh-Inya SFZ (Voskresenka-1 section); (д-ж) – angular-shaped non-rounded fragments of gravel-pebble material in aleurolite-argillites of the basal member of the diamictite Cheborsk Formation – appearance of the Terminal Husbergoya Lowstand Event (Hirnantian) in the Uymen-Lebed SFZ (Lebed section); (з) – limestones of the Dalmanitina member of the Tekhten Formation (isotope shift  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  of 6‰) (HICE) – appearance of the Hirnantian Lowstand Event (HICE) (Late Ordovician) in the Charysh-Inya SFZ (Burovlyanka section).

Для верхнего ордовика Чарышско-Инской и Ануйско-Чуйской СФЗ Горного Алтая «визитной карточкой» является присутствие в разрезах масштабных рифовых сооружений [Sennikov et al., 2008, 2019, 2020]. Они установлены на определенных хроностратиграфических интервалах: а) в раннесреднем катиане, б) в позднем катиане и в) в раннем хирнанте. Так как рост масштабных рифовых массивов происходит исключительно на стадиях трансгрессий, такие процессы в Алтайском позднеордовикском палеобассейне (Чарышско-Инская и Ануйско-Чуйская СФЗ) могли происходить только в промежутках между глобальными регрессивными событиями – а) между Линеарис (Linearis) и Гримосойя (Grimosoya); б) между Гримосойя и Терминальным Хусбергоя (Terminal Husbergoya); в) между Терминальным Хусбергоя и Хирнантским (Hirnant) событием. Этот вопрос требует дополнительного изучения, в том числе с позиций событийной стратиграфии. В противном случае придется искать причины резких эпизодических региональных прогибаний дна Алтайского позднеордовикского бассейна со скоростями, заведомо превышающими скорость глобальных падений уровня Мирового океана.

## 6. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ОРДОВИКСКИХ БИОТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ГОРНОМ АЛТАЕ И САЛАИРЕ

На границе тремадока и флояна (аренига в ранее применяемой британской шкале) выделяется крупное биотическое событие коренной перестройки таксономического состава пелагических и бентосных сообществ – Базальное Аренигское (Basal Arenig BioEvent) [Walliser, 1986], основной причиной которого предполагается глобальная трансгрессия. Это биотическое событие коррелируется с основанием граптолитовой зоны *T. approximatus*. В Алтайском бассейне Базальное Аренигское биособытие и соответственно глобальное трансгрессивное событие Биллинген (Billingen) идентифицируются в низах тулойской свиты (Уйменско-Лебедская СФЗ). Это раннефлоское (раннеаренигское) глобальное биотическое событие вымирания тремадокских фаунистических сообществ как в бентосных, так и в планктонных группах фауны. Восстановление таксономического разнообразия и плотностей популяций

алтайских и салаирских ордовикских бентосных сообществ (трилобитов и брахиопод) происходило значительно медленнее, чем пелагических сообществ планктонных граптолитов. Об этом свидетельствует практически полное отсутствие находок бентосной фауны в нижнефлоских последовательностях, например в нижней части тулойской свиты Уйменско-Лебедской СФЗ Горного Алтая и в верхах чупинской свиты Бердско-Ельцовской СФЗ Салаира [Sennikov et al., 2018]. В то же время уже в самых низах тулойской свиты найден таксономически разнообразный комплекс планктонных граптолитов [Sennikov, 1996; Sennikov et al., 2018, 2019].

Средняя часть воскресенской свиты (куйбышевский горизонт) – практически полное отсутствие трилобитов и брахиопод [Sennikov et al., 2018, 2019], что является следствием медленного восстановления таксономического разнообразия бентосных групп после глобального седиментационного события Хельскиер (Helskjer Drowning) [Nielsen, 2004] и связанной с ним кардинальной перестройки таксономического состава биот.

Терминальное ордовикское глобальное биотическое событие вымирания [Sennikov, 1998] зафиксировано на границе ордовика и силура в переходных слоях техтенской свиты и свиты Вторых Утесов в Чарышско-Инской СФЗ Горного Алтая. После вымирания подавляющего большинства не только видовых, но и родовых и семейственных категорий граптолитов последующая их инновация и затем диверсификация произошли в течение 1.5 граптолитовых зон (около 1 млн лет). При этом восстановление таксономического разнообразия бентосных сообществ брахиопод и трилобитов происходило значительно медленнее – весь рудданский век лландоверийской эпохи силура (более 3 млн лет).

## 7. ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ СТРАТИГРАФИИ МЕСТНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ СТРАТОНОВ ОРДОВИКА ГОРНОГО АЛТАЯ И САЛАИРА

При обобщении био- и литостратиграфических материалов по ордовикским осадочным образованиям Горного Алтая и Салаира в ряде работ маркирующие горизонты грубообломочных пород в основаниях местных

стратонов ошибочно принимались как разновозрастные, являющиеся следствием одного тектонического процесса. Например, конгломераты в основании бугрышихинской свиты Горного Алтая (Чарышско-Инская и Ануйско-Чуйская СФЗ), базальные гравелиты зайчихинской свиты Бердско-Ельцовской СФЗ Салаира и базальные грубозернистые песчаники карастунской свиты Гурьевско-Ельцовской СФЗ Салаира [Gintsinger, Sennikov, 1967] считались одновременным проявлением региональной складчатости. Другой пример – по базальным конгломератам воскресенской свиты Чарышско-Инской СФЗ [Sennikov et al., 1982] и базальным конгломератам тулойской свиты [Petrunina et al., 1984] был определен возраст крупнейшего регионального несогласия в основании ордовикско-девонского осадочного комплекса. Это региональное несогласие отвечает в Алтайском регионе окончанию островодужного режима (агайринская свита пестроцветных песчаников, андезитовых порфиринов и их туфов [Sennikov et al., 2018]) и началу режима пассивной континентальной окраины, существовавшего с раннефлоского века раннего ордовика по средний девон [Yolkin et al., 1994]. Этот режим характеризовался непрерывной последовательностью латерально выдержанных, ритмично (трансгрессивно-регрессивно) повторяющихся, исключительно осадочных, терригенных и терригенно-карбонатных (включая рифогенные) образований со средней мощностью местных стратонов, не превышающей нескольких сотен метров.

Переход на зональное биостратиграфическое определение положения границ ордовикских местных стратонов позволил значительно точнее, чем ярус и подъярус, зафиксировать их стратиграфический уровень [Sennikov et al., 2014]. Было установлено несовпадение на одну-две биостратиграфических зоны (не менее 2–3 млн лет) ранее считавшихся разновозрастными границ местных стратонов в различных СФЗ – например вышеотмеченных границ бугрышихинской, карастунской и иловатской (первый пример) и границ воскресенской и тулойской свит (см. выше второй пример) [Sennikov et al., 2018].

Выявление в последние годы [Sennikov et al., 2010, 2011, 2013, 2014, 2015a, 2019] кратковременных глобальных седиментационных событий в ордовикской осадочной последовательности Горного Алтая и Салаира определило актуальную необходимость пересмотра последовательности региональных подразделений (горизонтов) с целью уточнения положения их границ относительно зональных подразделений по граптолитам и конодонтам.

После создания точной зональной биостратиграфической основы и составления нового поколения Региональной стратиграфической схемы ордовика западной части Алтае-Саянской складчатой области [Sennikov et al., 2018] все же остались дискуссионными ряд вопросов. Перечислим некоторые из них, при решении которых рекомендуется обязательно использовать метод событийной стратиграфии.

1. Принятое в настоящее время положение нижней границы базальной пачки тулойской свиты Уйменско-Лебедской СФЗ в основании флоского яруса нуждается в уточнении. Вероятнее всего, нижней границе флоского яруса отвечает верхняя граница базальной конгломератовой пачки, непосредственно над которой залегают черные относительно глубоководные аргиллиты с граптолитами зоны *Tetragraptus approximatus* [Sennikov et al., 2018, 2019].

2. Нет убедительных доказательств разновозрастности нижней границы иловатской свиты Бердско-Ельцовской СФЗ Салаира, нижней границы изыракской свиты Бердско-Ельцовской СФЗ Салаира и нижней границы воскресенской свиты Чарышско-Инской и Ануйско-Чуйской СФЗ Горного Алтая. Возможно, феномен угловых и структурных несогласий в основаниях воскресенской свиты Горного Алтая и иловатской свиты Салаира следует связывать с глобальным трансгрессивным событием Эва (Evae) [Nielsen, 2004, 2011; Vintaned, Schmitz, 2011].

3. Относительно условно принято, что нижняя граница веберовской свиты Гурьевско-Ельцовской СФЗ Салаира и нижняя граница ханхаринской свиты Чарышско-Инской и Ануйско-Чуйской СФЗ Горного Алтая имеют разновозрастное стратиграфическое положение. При рассмотрении этого вопроса с использованием методов событийной стратиграфии можно предположить, что основание ханхаринской свиты Горного Алтая является следствием трансгрессивного события Аристад (Arestad Drowning), а основание веберовской свиты Салаира обусловлено влиянием регрессивного события Фрогнеркилен (Frognerkilen).

4. Нижняя граница ханхаринского горизонта официально зафиксирована в основании граптолитовой зоны *bicornis* (кровле зоны *wilsoni*). На этом уровне в Чарышско-Инской и Ануйско-Чуйской СФЗ Горного Алтая фиксируется седиментационное региональное событие в виде появления в базальной пачке ханхаринской свиты оолитовых известняков. Так как пока отсутствует точная привязка события Аристад (Arestad) к граптолитовой последовательности, можно допустить, что основание ханхаринского горизонта не отвечает локальному региональному событию, а является следствием (см. выше) глобального седиментационного события Аристад (Arestad).

5. Официально принятое положение нижней границы техтенского горизонта в основании подзоны *linearis* граптолитовой зоны *quadrimumcronatus* требует подтверждения и уточнения со стороны зонального биостратиграфического метода или со стороны метода событийной стратиграфии. Возможно, и в этом случае имело место воздействие одного из глобальных седиментационных событий *Linearis Drowning-1, -2, -3*.

6. Нижняя граница чеборской свиты в настоящее время [Sennikov et al., 2018, 2019] сопоставляется с основанием хирнантского яруса верхнего ордовика. Регрессивная природа базальной пачки чеборской свиты

с диамиктитами (см. выше) должна быть сопоставлена либо с глобальным регрессивным событием Терминальное Хусбергойя (Terminal Husbergoya), являющимся более древним, чем основание хирнанта, либо с глобальным регрессивным событием Хирнант (Hirnantian Lowstand), проявившимся внутри хирнантского яруса. Вопрос точного хроностратиграфического положения нижней границы чеборской свиты требует дополнительного изучения.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зафиксированные в разрезах отдельных регионов глобальные седиментационные и (или) биотические события могут без помощи (без применения) региональных стратонтов (горизонтов) служить прецизионной основой для прямой корреляции местных стратиграфических подразделений с ярусными подразделениями Общей (и Международной) стратиграфической шкалы.

Установленная последовательность глобальных седиментационных и (или) биотических событий обладает принципом самодостаточности для глобальных реконструкций геологической истории древних бассейнов седиментации. Из других стратиграфических методов такую самодостаточность имеет только метод зональной стратиграфии по ортостратиграфическим группам фауны.

Выявление следов глобальных и региональных седиментационных событий дает новый, точный, дополнительный инструмент: а) для корреляции осадочных образований различных седиментационных палеобассейнов и б) для построения нового поколения региональных стратиграфических схем.

Глобальные седиментационные события являются триггерами биотических событий вымираний.

В региональном плане на посткризисные инновации и биодиверсификации внутри фаунистических групп доминирующее влияние оказывают региональные процессы, включая опосредованное воздействие региональных седиментационных событий.

Распознавание глобальных событий в конкретном регионе или его части – это прямая задача событийной стратиграфии. При использовании методов событийной стратиграфии может быть использован метод решения обратной задачи (его пока не используют при геодинамических и палеогеографических реконструкциях). Если на каком-то хроностратиграфическом уровне в регионе при целенаправленных исследованиях не фиксируются следы глобальных трансгрессивных или регрессивных седиментационных событий, то можно сделать вывод о существовании «подавляющих» их региональных геологических явлений (процессов). Пример – изырацкая свита нижнего ордовика, сложенная темно-стально-серыми песчаниками и алевролитами в Бердско-Хмелевской СФЗ Салаира без базальных конгломератов с постепенным переходом согласно залегающая на чупинской свите, представленной лилово-серыми и зеленовато-темно-серыми алевролитами и аргиллитами. Требуется найти объяснение отсутствию

следов глобального раннефлоского (раннеаренигского) трансгрессивного седиментационного события Биллинген (Billingen).

Выборочное «проявление» следов глобальных трансгрессивных или регрессивных седиментационных событий только в отдельных (не во всех) частях геологического региона, считавшегося ранее единым палеобассейном, позволяет предполагать его композитность («мозаичность» современного строения). На этом основании Уйменско-Лебедская фациальная зона Алтая обособляется как самостоятельный палеобассейн со специфичной (в отличие от других частей Алтая) историей развития в ордовикском периоде. По тем же событийным феноменам, описанным в настоящей статье, Алтайский ордовикский бассейн (Чарышко-Инская и Ануйско-Чуйская СФЗ) нельзя рассматривать как единый палеобассейн вместе с Салаирским ордовикским бассейном. Вопрос необходимости разделения Салаирского ордовикского бассейна на две обособленные палеоакватории (Бердско-Хмелевская и Гурьевско-Ельцовская СФЗ) требует дополнительного изучения, в том числе с применением метода событийной стратиграфии.

Авторы координируют исследования с проектом 653 Международной программы геологической корреляции (IGCP).

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Aceñolaza F.G. (Ed.), 2002. Aspects of the Ordovician System in Argentina. Serie Correlación Geológica. Vol. 16. INSUGEO, Tucumán, 370 p.
- Bergstrom S.M., Salzman M.M., Schmitz B., 2006. First Record of the Hirnantian (Upper Ordovician)  $\delta^{13}C$  Excursion in the North American Midcontinent and Its Regional Implications. *Geological Magazine* 143 (5), 657–678. <https://doi.org/10.1017/S0016756806002469>.
- Brenchley P.J., 1988. Environmental Changes Close to the Ordovician – Silurian Boundary. *Bulletin of the British Museum (Natural History). Geology* 43, 377–385.
- Brenchley P.J., 2004. End Ordovician Glaciation. In: B. Webby, F. Paris, M.L. Droser, I.G. Percival (Eds), *The Great Ordovician Biodiversification Event*. Columbia University Press, New York, p. 81–83.
- Brenchley P.J., Romano M., Young T.P., Storch P., 1991. Hirnantian Glaciomarine Diamictites – Evidence for the Spread of Glaciation and Its Effect on Upper Ordovician Faunas. In: *Advances in Ordovician Geology. Proceedings of the Fifth International Symposium on the Ordovician System*. Geological Survey of Canada 90–9, p. 325–336. <https://doi.org/10.4095/132199>.
- Calner M., 2008. Silurian Global Events – at the Tipping Point of Climate Change. In: Ashraf M.T. Elewa (Ed.), *Mass Extinctions*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 21–58. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-75916-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-75916-4_4).
- Chen X., Rong J., Fan J., Zhan R., Mitchell Ch.E., Harper D.A.T., Melchin M.J., Peng P., 2006. The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the Base of the Hirnantian Stage (the Uppermost of the Ordovician System). *Episodes*

29 (3), 183–196. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2006/v29i3/004>.

Dronov A.V., 2020. Cosmic Dust as a Trigger of the Middle Ordovician Cooling and the Main Phase of the Great Ordovician Biodiversification. In: Biogeography and Evolutionary Processes. Proceedings of the LXVI Session of the Paleontological Society (April 6–10, 2020). VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, p. 55–56 (in Russian) [Дронов А.В. Космическая пыль как триггер среднеордовикского похолодания и основной фазы Великой ордовикской биодиверсификации // Биogeография и эволюционные процессы: Материалы LXVI сессии Палеонтологического общества (6–10 апреля 2020 г.). СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2020. С. 55–56].

Dronov A.V., Koren' T.N., Popov L.E., Tolmacheva T.Yu., 1998. The Event Stratigraphy Method for Justification of Regional Strata Correlations – Case of the Lower Ordovician of the Northwestern Regions of Russia. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 88 p. (in Russian) [Дронов А.В., Корень Т.Н., Попов Л.Е., Толмачева Т.Ю. Методика событийной стратиграфии в обосновании корреляции региональных стратонов на примере нижнего ордовика северо-запада России. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. 88 с.].

Erdtmann B.-D., 1984. Outline Ecostratigraphic Analysis of the Ordovician Graptolite Zones in Scandinavia in Relation to the Palaeogeographic Disposition of the Japetus. *Geologica et Palaeontologica* 18, 9–15.

Erdtmann B.-D., 1986. Early Ordovician Eustatic Cycles and Their Bearing on Punctuations in Early Nematophorid (Planktic) Graptolite Evolution. In: O.H. Walliser (Eds), *Global Bio-Events. Lecture Notes in Earth Sciences. Vol. 8*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 139–152. <https://doi.org/10.1007/BFb0010199>.

Gintsinger A.B., Sennikov V.M., 1967. Ordovician Altai-Sayan Region. In: B.S. Sokolov (Ed.), *Stratigraphy of the Paleozoic Central Siberia*. Nauka, Novosibirsk, p. 74–86 (in Russian) [Гинцингер А.Б., Сенников В.М. Ордовик Алтае-Саянской области // Стратиграфия палеозоя Средней Сибири / Ред. Б.С. Соколов. Новосибирск: Наука, 1967. С. 74–86].

Gradstein F.M., Ogg J.G., Smith A.G., Ogg G.M., 2012. *The Geologic Time Scale 2012. Vol. 1*. Elsevier, Amsterdam, 1144 p.

Harper D.A.T., Cascales-Miñana B., Servais T., 2020. Early Palaeozoic Diversifications and Extinctions in the Marine Biosphere: A Continuum of Change. *Geological Magazine* 157 (Spec. Iss. 1), 5–21. <https://doi.org/10.1017/S0016756819001298>.

Heck P.R., Schmitz B., Rout S.S., Tenner T., Villalon K., Cronholm A., Terfelt F, Kita N.T., 2016. A Search for H-Chondritic Chromite Grains in Sediments That Formed Immediately after the Breakup of the L-Chondrite Parent Body 470 Ma Ago. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 177, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.11.042>.

Kaljo D., Martma T., 2011. Carbon Isotope Trend in the Mirny Creek Area, NE Russia, Its Specific Features and Possible Implications of the Uppermost Ordovician Stratigraphy.

In: J.C. Gutiérrez-Marco, I. Rábano, D. García-Bellido (Eds), *Ordovician of the World. Cuadernos del Museo Geominero. IGME, Madrid*, p. 267–273.

Koren' T.N. (Ed.), 2000. *The Use of Event Stratigraphic Levels for Interregional Correlation of the Phanerozoic of Russia. Guidebook*. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 170 p. (in Russian) [Использование событийно-стратиграфических уровней для межрегиональной корреляции фанерозоя России: Методическое пособие / Ред. Т.Н. Корень. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. 170 с.].

Ling M.X., Zhan R.B., Wang G.X., Wang Y., Amelin Y., Tang P., Liu J.B., Jin J., 2019. An Extremely Brief End Ordovician Mass Extinction Linked to Abrupt Onset of Glaciation. *Solid Earth Sciences* 4 (4), 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2019.11.001>.

Martin E., Schmitz B., Schönlaub H.-P., 2018. From the Mid-Ordovician into the Late Silurian: Changes in the Micrometeorite Flux after the L Chondrite Parent Breakup. *Meteoritics & Planetary Science* 53 (12), 2541–2557. <https://doi.org/10.1111/maps.13174>.

Mauviel A., Sinnesael M., Desrochers A., 2020. The Stratigraphic and Geochemical Imprints of the Ordovician Glaciation on Far-Field Neritic Carbonates, Anticosti Island, Eastern Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 543, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109579>.

McDougall M.D., Gruenwald R., 2011. Ice in the Sahara: The Upper Ordovician Glaciation in SW Libya – a Subsurface Perspective. In: J.C. Gutiérrez-Marco, I. Rábano, D. García-Bellido (Eds), *Ordovician of the World. Cuadernos del Museo Geominero. IGME, Madrid*, p. 347–352.

Meidla T., Ainsaar L., Truuver K., 2011. Ostracods in Baltoscandia through the Hirnantian Crises. In: J.C. Gutiérrez-Marco, I. Rábano, D. García-Bellido (Eds), *Ordovician of the World. Cuadernos del Museo Geominero. IGME, Madrid*, p. 353–357.

Miller J.F., 1984. Cambrian and Earliest Ordovician Conodont Evolution, Biofacies and Provincialism. In: D.L. Clark (Ed.), *Conodont Biofacies and Provincialism. Geological Society of America Special Papers* 196, p. 43–68.

Mitchell C.E., Storch P., Holmden C., Melchin V.J., Gutiérrez-Marco J.C., 2011. New Stable Isotope Data and Fossils the Hirnantian Stage in Bohemia and Spain: Implications for Correlation and Paleoclimate. In: J.C. Gutiérrez-Marco, I. Rábano, D. García-Bellido (Eds), *Ordovician of the World. Cuadernos del Museo Geominero. IGME, Madrid*, p. 371–378.

Moreau J., Ghienne J.-F., Le Heron J.P., Rubino J.-L., Deynoux M., 2005. A 440 Million Year Old Ice Stream in North Africa. *Geology* 33 (9), 753–756. <https://doi.org/10.1130/G21782.1>.

Munnecke A., Calner M., Harper D.T., Servais T., 2010. Ordovician and Silurian Sea-Water Chemistry, Sea Level, and Climate: A Synopsis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 296 (3–4), 389–413. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.08.001>.

Nicoll R.S., Laurie J.R., Shergold J.H., Nielsen A.T., 1992. Preliminary Correlation of Latest Cambrian to Early Ordovician

Sea Level Events in Australia and Scandinavia. *Unknown Journal* 14, 381–394.

Nielsen A.T., 2003. Ordovician Sea Level Changes: Potential for Global Event Stratigraphy. In: G.I. Albanesi, M.S. Beresi, S.H. Peralta (Eds), *Proceedings of the 9th International Symposium on the Ordovician System. Serie Correlacion Geologica. Vol. 17. INSUGEO, Tucumá*, p. 445–449.

Nielsen A.T., 2004. Ordovician Sea Level Changes: A Baltoscandian Perspective. In: B. Webby, F. Paris, M.L. Droser, I.G. Percival (Eds), *The Great Ordovician Biodiversification Event. Columbia University Press, New York*, p. 84–93.

Nielsen A.T., 2011. A Re-Calibrated Revised Sea Level Curve for the Ordovician Baltoscandia. In: J.C. Gutiérrez-Marco, I. Rábano, D. García-Bellido (Eds), *Ordovician of the World. Cuadernos del Museo Geominero. IGME, Madrid*, p. 399–401.

Petrulina Z.E., Sennikov N.V., Ermikov V.D., Zeifert L.L., Krivchikov A.V., Puzyrev A.A., Severgina L.G., Obut A.M., Zaslavskaya N.M., 1984. *Stratigraphy and Fauna of the Lower Ordovician of Gorny Altai. Nauka, Moscow*, 124 p. (in Russian) [Петрунина З.Е., Сенников Н.В., Ермиков В.Д., Зейферт Л.Л., Кривчиков А.В., Пузырев А.А., Севергина Л.Г., Обут А.М., Заславская Н.М. Стратиграфия и фауна нижнего ордовика Горного Алтая. М.: Наука, 1984. 124 с.]

Rasmussen C.M.Ø., Ulimann C.V., Jakobsen K.G., Lindskog A., Hansen J., Hansen T., Eriksson M.E., Dronov A., Frei R., Korte C., Nielsen A.T., Harper D., 2016. Onset of Main Phanerozoic Marine Radiation Sparked by Emerging Mid Ordovician Icehouse. *Scientific Reports* 6, 18884. <https://doi.org/10.1038/srep18884>.

Schonlaub H.P., Ferretti A., Gaggero L., Hammarlund E., Harper D.A.T., Histon K., Priewalder H., Spotl C., Storch P., 2011. The Late Ordovician Glacial Event in the Carnic Alps (Austria). In: J.C. Gutiérrez-Marco, I. Rábano, D. García-Bellido (Eds), *Ordovician of the World. Cuadernos del Museo Geominero. IGME, Madrid*, p. 515–526.

Sennikov N.V., 1996. Paleozoic Graptolites from the Central Siberia Systematics, Phylogeny, Biochronology, Biological Nature, Paleozoogeography. Publishing House of SPC UIGGM SB RAS, Novosibirsk, 225 p. (in Russian) [Сенников Н.В. Граптолиты палеозоя Средней Сибири (систематика, филогения, биохронология, биологическая природа, палеозоогеография). Новосибирск: Изд-во НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1996. 225 с.]

Sennikov N.V., 1998. Manifestations of Global Ordovician-Silurian Biotic Crisis in the Central-Siberian Graptolite Communities. *Russian Geology and Geophysics* 39 (5), 557–567 (in Russian) [Сенников Н.В. Проявления глобального ордовикско-силурийского биотического кризиса в граптолитовых сообществах Средней Сибири // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 5. С. 557–567].

Sennikov N.V., Ainsaar L., Meidla T., 2015a. Hirnantian Isotope Carbon Excursion in Gorny Altai, Southwestern Siberia. *Estonian Journal of Earth Sciences* 64 (3), 225–232. <https://doi.org/10.3176/earth.2015.29>.

Sennikov N.V., Ermikov V.D., Petrunina Z.E., Puzyrev A.A., Severgina L.G., 1982. On the Age of Basal Horizons of the Ordovician-Middle Devonian Complex of the Northwestern

Altai. *Russian Geology and Geophysics* 8, 56–61 (in Russian) [Сенников Н.В., Ермиков В.Д., Петрунина З.Е., Пузырев А.А., Севергина Л.Г. О возрасте базальных горизонтов ордовикско-среднедевонского комплекса Северо-Западного Алтая // Геология и геофизика. 1982. № 8. С. 56–61].

Sennikov N.V., Khabibulina R.A., Luchinina V.A., Obut O.T., Tokarev D.A., 2020. Late Ordovician and Early Silurian Reefs of Gorny Altai – Age, Structure, Paleobiota, and Paleogeographical Position. In: *Biogeography and Evolutionary Processes. Proceedings of the LXVI Session of the Paleontological Society (April 6–10, 2020). VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg*, p. 153–155 (in Russian) [Сенников Н.В., Хабибулина Р.А., Лучинина В.А., Обут О.Т., Токарев Д.А. Позднеордовикские и раннесилурийские рифы Горного Алтая – возраст, строение, палеобиоты и палеогеографическое положение // Биогеография и эволюционные процессы: Материалы LXVI сессии Палеонтологического общества (6–10 апреля 2020 г.). СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2020. С. 153–155].

Sennikov N.V., Lykova E.V., Obut O.T., Tolmacheva T.Y., Izokh N.G., 2014. The New Ordovician Stage Standard as Applied to the Stratigraphic Units of the Western Altai-Sayan Folded Area. *Russian Geology and Geophysics* 55 (8), 971–988. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.07.005>.

Sennikov N.V., Obut O.T., 2002. Testing of the Chitinizoan Zonal Succession According to the Graptolite Zonal Scale (Ordovician, Gorny Altai and Moscow Syncline). *News of Paleontology and Stratigraphy. Supplement to Russian Geology and Geophysics* 5 (43), 51–63 (in Russian) [Сенников Н.В., Обут О.Т. Тестирование зональной последовательности по хитинозоям на базе граптолитовых зон (ордовик, Горный Алтай и Московская синеклиза) // Геология и геофизика. Приложение «Новости палеонтологии и стратиграфии». 2002. Т. 43. Вып. 5. С. 51–63].

Sennikov N.V., Obut O.T., Bukolova E.V., Tolmacheva T.Yu., 2010. Global Late Cambrian – Early Ordovician Sedimentary Events and Their Appearances in the Altai Shelf and Paleo-Asian Oceanic Basins. In: *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent). Proceedings of the Scientific Meeting on the Basic Research Program of the Earth Sciences Section of RAS (October 14–17, 2010). Iss. 8. Vol. 2. IES SB RAS, Irkutsk*, p. 78–80 (in Russian) [Сенников Н.В., Обут О.Т., Буколова Е.В., Толмачева Т.Ю. Глобальные позднекембрийско-раннеордовикские седиментационные события и их проявления в Алтайском шельфовом и Палеоазиатском океаническом бассейнах // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания по Программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН (14–17 октября 2010 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. Вып. 8. Т. 2. С. 78–80].

Sennikov N.V., Obut O.T., Bukolova E.V., Tolmacheva T.Yu., 2011. Traces of the Global and Regional Sedimentary Events in Early Ordovician Sections of the Gorny Altai (Siberia). In: J.C. Gutiérrez-Marco, I. Rábano, D. García-Bellido (Eds),

Ordovician of the World. Cuadernos del Museo Geominero. IGME, Madrid, p. 553–557.

Sennikov N.V., Obut O.T., Izokh N.G., Kipriyanova T.P., Lykova E.V., Tolmacheva T.Yu., Khabibulina R.A., 2018. The Regional Stratigraphic Chart for the Ordovician of the Western Part Altai-Sayan Folded Area (New Version). *Geology and Mineral Resources of Siberia* 7с, 15–53 (in Russian) [Сенников Н.В., Обут О.Т., Изох Н.Г., Киприянова Т.П., Лыкова Е.В., Толмачева Т.Ю., Хабибулина Р.А. Региональная стратиграфическая схема ордовикских отложений западной части Алтае-Саянской складчатой области (новая версия) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2018. № 7с. С. 15–53.

Sennikov N.V., Obut O.T., Lykova E.V., Khabibulina R.A., 2013. Traces of Global and Regional Sedimentary and Biotic Events in the Middle-Late Ordovician and Early Silurian Gorny Altai and Salair Sections (Siberia). In: A. Lindskog, K. Mehlqvist, Proceeding of the 3rd IGCP 591 Annual Meeting (June 9–19, 2013). Lund, Sweden, p. 287–289.

Sennikov N.V., Obut O.T., Lykova E.V., Timokhin A.V., Gonta T.V., Khabibulina R.A., Shcherbanenko T.A., Kipriyanova T.P., 2019. Ordovician Sedimentary Basins and Paleobiotas of the Gorny Altai. SB RAS Publishing House, Novosibirsk, 183 p.

Sennikov N.V., Timokhin A.V., Lykova E.V., 2017. Depth Differentiation of the Middle Ordovician Graptolite and Trilobite Complexes of Gorny Altai. *Russian Geology and Geophysics* 58 (6), 711–726. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.03.019>.

Sennikov N.V., Tolmacheva T.Y., Obut O.T., Izokh N.G., Lykova E.V., 2015b. Zonation of the Siberian Ordovician Deposits Based on Pelagic Groups of Fauna. *Russian Geology and Geophysics* 56 (4), 594–610. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.03.010>.

Sennikov N.V., Yolkin E.A., Petrunina Z.E., Gladkikh L.A., Obut O.T., Izokh N.G., Kipriyanova T.P., 2008. Ordovician-Silurian Biostratigraphy and Paleogeography of the Gorny Altai. SB RAS Publishing House, Novosibirsk, 156 p.

Servais T., Harper D.A.T., 2018. The Great Ordovician Biodiversification Event (Gobe): Definition, Concept and Duration. *Lethaia* 51 (2), 151–164. <https://doi.org/10.1111/let.12259>.

Trotter J.A., Williams I.S., Barnes C.R., Lécuyer C., Nicoll R.S., 2008. Did Cooling Oceans Trigger Ordovician Biodiversification? Evidence from Conodont Thermometry.

*Science* 321 (5888), 550–554. <https://doi.org/10.1126/science.1155814>.

Underwood C.J., Crowley S.F., Marshall J.D., Brenchley P.J., 1997. High-Resolution Carbon Isotope Stratigraphy of the Basal Stratotype (Dob's Linn, Scotland) and Its Global Correlation. *Journal of the Geological Society* 154, 709–718. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.154.4.0709>.

Vintaned J.A., Schmitz U., 2011. The Late Tremadocian – Early Arenigian 2nd Order Sequence of the Cadenas Ibericas (NE Spain) and Its Comparison with Baltica. In: J.C. Gutiérrez-Marco, I. Rábano, D. García-Bellido (Eds), Ordovician of the World. Cuadernos del Museo Geominero. IGME, Madrid, p. 163–168.

Walliser O.H. (Ed.), 1986. Global Bio-Events. A Critical Approach Proceedings of the First International Meeting of the IGCP Project 216 "Global Biological Events in Earth History". Lecture Notes in Earth Sciences. Vol. 8. Springer, Berlin, Heidelberg, 442 p. <https://doi.org/10.1007/BFb0010185>.

Walliser O.H. (Ed.), 1996. Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic. Results of the International Interdisciplinary Cooperation in the IGCP-Project 216 "Global Biological Events in Earth History". Springer, Berlin, Heidelberg, 333 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-79634-0>.

Yolkin E.A., Sennikov N.V., Buslov M.M., Yazikov A.Yu., Gratsianova R.T., Bakharev N.K., 1994. Paleogeographic Reconstructions of the Western Altai-Sayan Region in the Ordovician, Silurian, and Devonian and Their Geodynamic Interpretation. *Russian Geology and Geophysics* 36 (7–8), 118–144 (in Russian) [Елкин Е.А., Сенников Н.В., Буслов М.М., Язиков А.Ю., Грацианова Р.Т., Бахарев Н.К. Палеогеографические реконструкции западной части Алтае-Саянской области в ордовике, силуре и девоне и их геодинамическая интерпретация // Геология и геофизика. 1994. Т. 36. № 7–8. С. 118–144].

Zhamoyda A.I. (Ed.), 2000. Supplement to the Stratigraphic Code of Russia. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 109 p. (in Russian) [Дополнение к стратиграфическому кодексу России / Ред. А.И. Жамойда. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. 109 с.].

Zhamoyda A.I. (Ed.), 2019. Stratigraphic Code of Russia. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 92 p. (in Russian) [Стратиграфический кодекс России / Ред. А.И. Жамойда. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2019. 92 с.].