

## Феномен Бурейского оползня: данные полевых исследований и модель формирования

А.А.КОКОВКИН (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт тектоники и геофизики им. Ю.А.Косыгина Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИТиГ ДВО РАН); 680000, г. Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, 65)

Приведены результаты полевого изучения Бурейского скального оползня. Явление представлено как динамично развивающаяся, сложноорганизованная геологическая система. Изучена позиция оползня в региональной структуре, исследована внутренняя структура оползневого узла – его материнского субстрата, оползневого цирка, остаточного оползневого шлейфа и стенок отрыва. Выделен основной источник энергии оползнеобразования – напряжённо-деформированное состояние оползневого субстрата, доведённое до порога критичности импульсной сдвиговой тектоникой. Исследованы тектонические деформации, проявленные до и во время события, следы «цунами» и возвратной волны. Разработана эволюционная модель оползнеобразования.

*Ключевые слова:* оползень, цунами, сдвиговые деформации, напряжённо-деформированное состояние.

Коковкин Александр Александрович  
доктор геолого-минералогических наук



kokovkin@itig.as.khb.ru.

## Bureya rockslide phenomenon: field data and rockslide formation model

A.A.KOKOVKIN (Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS)

The results of Bureya rockslide field study are presented. The phenomenon appears to be a dynamically evolving geological system with a complicated structure. The position of a phenomenal rockslide in the regional geological structure is examined, and the internal structure of the rockslide (a source rock substrate, a rockslide cirque, a residual rockslide tail and scarps, and its host geological structure) is investigated. The main energy source of the rockslide formation is determined which is revealed to be the stress-strain state of the rockslide substrate reaching a critical threshold due to impulse strike-slip fault tectonics. Tectonic deformations displayed before and during the event and traces of a «tsunami» and a backward wave are investigated. The evolutionary rockslide model is developed.

*Key words:* rockslide, tsunami, strike-slip fault deformations, stress-strain state.

*Бурейский оползень* (рис. 1, А) сошёл с южного борта р. Бурей в её среднем течении (100 км выше Бурейской ГЭС) 12 декабря 2018 г. Русло реки оказалось полностью перекрытым, что мешало нормальной работе ГЭС и грозило подтоплением населённых пунктов выше по течению. Неординарность этого события с целым рядом его особенностей и вызванным им экологическим риском привлекли к нему пристальное внимание науки и общественности. Краткое сообщение о нём, составленное по данным космического мониторинга, было оперативно опубликовано Л.С.Крамаревой с коллегами [7]. Свежие следы этого события были изучены автором «in situ» в экспедиции 12–16 января 2019 г., проведённой вместе с группой сотрудников ИВЭП и ИТиГ ДВО РАН.

Специфику события определило то, что оползень развивался на крепком скальном субстрате в зимнее время. Температура воздуха 11–12 декабря на ближайшей метеостанции (пост Чекунда) ночью опустилась до  $-36,2^{\circ}\text{C}$ . Необычно и то, что развитие оползня сопровождалось мощной волной типа цунами. Такие явления обычно вызываются достаточно интенсивными землетрясениями. Однако сейсмологическим мониторингом ни здесь, ни на дальней периферии следов даже малых землетрясений зафиксировано не было. Тем не менее, сейсмостанциями Бурейской ГЭС (данные М.С.Харитоновой) отмечен проход двух цугов поверхностных волн небольшой интенсивности со скоростью порядка  $3,17\text{ км/с}$  (см. рис. 1, Б). Первый, наиболее выраженный цуг

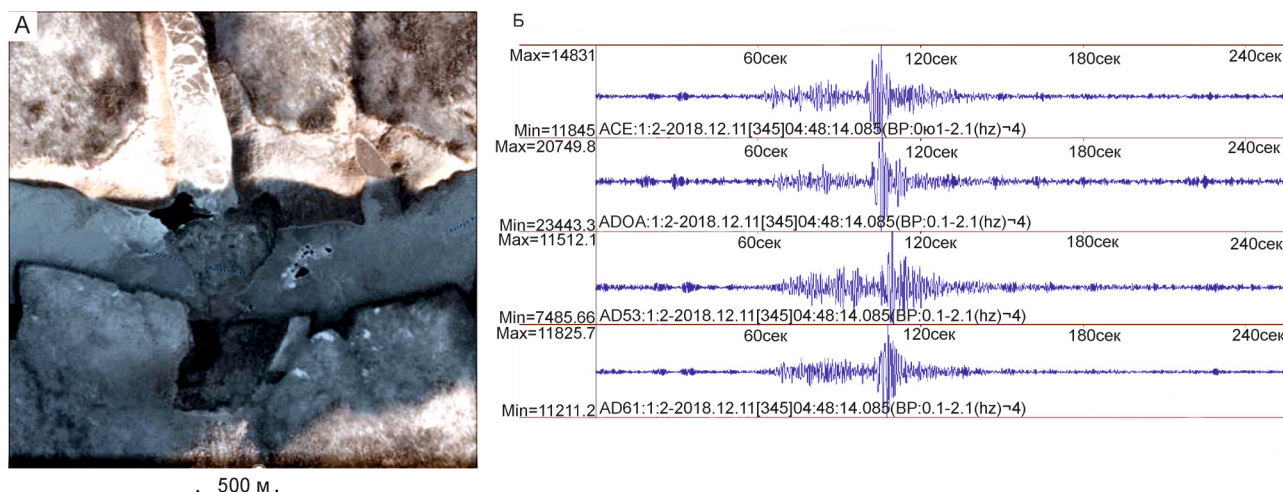


Рис. 1. Бурейская оползневая система. По данным М.Е.Харитоновой:

А – состояние оползня, по данным космического мониторинга, снимок 13.12.2018 г. <https://www.planet.com/explorer/>; Б – характер волнового сейсмического поля во время схода оползня, зафиксированный сейсмостанциями Бурейской ГЭС

прошёл 11.12.18 в 4 час. 48 мин. 48 сек (по Гринвичу), второй – через 4 мин. 25 сек. после него. Событие и было привязано по времени к интервалу, ограниченному этими цугами.

Для автора, уже имевшего опыт изучения оползневых систем Волжского Правобережья [6], ещё на стадии подготовки экспедиции обозначилась необходимость рассматривать Бурейский оползень как *сложноорганизованную геологическую систему*. Полученные в экспедиции сведения подтвердили эту установку и показали, что, кроме отмеченных явлений, событие несёт следы неоднократных тектонических деформаций субстрата оползня и его ближней периферии. Изучению этих деформаций было уделено самое пристальное внимание. В процессе работ были также получены данные по внутреннему строению оползня, исследованы следы «цунами» и возвратной волны, частично восстановившей нарушенное ею равновесие водной системы Буреи.

Анализ свежих, хорошо выраженных следов всех этих процессов с исследованием их взаимосвязей позволил развернуть во времени «мгновенно», динамично развивающуюся систему оползня и разработать вариант её непростой эволюционной модели. Эта модель также объясняет и вызванное оползнем сужение русла Буреи, сохранившееся и после проведённых там взрывных работ. Основные положения модели были изложены автором в докладе на Косыгинских чтениях [4].

**Особенности методики работ.** Особенностью оползней является *нерегулярность их распределения*

*во времени и пространстве при почти мгновенном развитии*, что практически исключает возможность непосредственного наблюдения за ними. Моделирование их систем выполняется *по следам* уже свершившихся событий. В связи с этим исключительно важен сам процесс выделения данных следов. Он далеко не прост – в завершившей своё формирование оползневой структуре значительная их часть маскирована различными до-, син- и постоползневыми процессами. По этой причине многие из данных следов не всегда фиксируются. Вероятно, именно поэтому классические модели оползней практически исключают из рассмотрения влияние на их формирование современной тектоники, а влияние землетрясений учитывается в них обычно лишь на уровне констатации сейсмического события, прошедшего в непосредственной близости от оползня.

Для корректного (всестороннего) изучения оползневой системы необходим *междисциплинарный подход*, позволяющий выделить весь комплекс оставленных ею следов и развернуть во времени и пространстве её сложноорганизованную систему. Методика таких исследований была разработана автором при изучении новейших разломов, деформационных систем землетрясений и астроблем Востока Азии, Поволжья и Намибии [2, 3, 5]. Их изучение проведено в рамках модели волновой нелинейной геодинамики, разрабатываемой автором на основе синергетической методологии и акцентированной на новейший (эоцен-голоценовый) этап. Все разломы Востока Азии, в соответствии с этой базисной моделью, развиваются

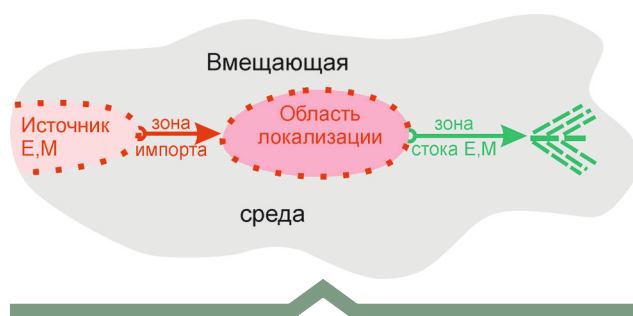


Рис. 2. Модель саморазвивающейся геологической системы. По работе [5]

в сложноорганизованном волновом (маятниковом) режиме знакопеременного сдвига. Этот режим определяет характер взаимодействия синхронно развивающихся разломных систем разной ориентировки и объясняет наличие двух существенных свойств континентальной коры – фрагментированности её разломов и сохранности целостности длительно функционирующих рифтогенных и орогенных структур, которые контролируются этими разломами.

С позиции синергетики *любая геологическая структура представляет собой результат необратимой эволюции соответствующей геологической системы* – открытой, самоорганизующейся, развивающейся в нелинейном, волновом режиме. Каждая система включает в себя *четыре основных элемента*: 1) источник энергии (E) и вещества (M); 2) область (зона) импорта энергии и вещества; 3) область локализации (внутреннего структурирования) и 4) область (зона) стока (диссипации или экспорта) энергии и вещества. Модель такой системы приведена на рис. 2.

Любой оползень представляет собой разновидность такой открытой системы. В качестве его обязательного элемента предполагается наличие *источника энергии* (E). Все оползни (в том числе скальные) приурочены к крутым бортам современных поднятий с расчленённым, неравновесным рельефом. Поднятия, на которых развиваются оползни, сформированы под влиянием новейшей сдвиговой тектоники. Сами поднятия развиваются в условиях *сжатия* и в связи с этим характеризуются высоким уровнем исходного *напряжённно-деформированного состояния* (НДС). Формируемое сдвиговой тектоникой сжатие и становится главным энергетическим источником систем оползнеобразования.

Склоны поднятий, на которых развиваются оползни, – это градиентная, метастабильная среда с действующим на ней контрастным, комплексным (фазовым, плотностным) барьером «земля–воздух».

Она уже подготовлена к разгрузке накопленных напряжений. При воздействии на неё дополнительных тектонических и(или) сейсмогенных (даже малоинтенсивных) деформаций её НДС может достичь порога критичности и тогда происходит мгновенная разгрузка напряжений. Большинство оползней – результат именно такой разгрузки.

Дополнительным фактором, способствующим сходу оползня, является флюидо-водонасыщенность материнского оползневого субстрата, повышающая степень его «ползучести». Это особенно характерно для *рыхлого, обводнённого* субстрата. С такой разновидностью оползней автор познакомился при изучении новейшей структуры Среднего Поволжья в интервале Камышин–Ульяновск [4]. Там оползни широко распространены на восточном борту волжского Правобережного свода с наложенной на него структурой абразионного уступа Волги. Сам свод сложен рыхлыми обводнёнными осадками мезозоя и кайнозоя. Все его оползни приурочены к зонам широтных новейших (в том числе голоценовых) разломов, насыщенных также и голоценовыми сейсмодислокациями.

В качестве исходной структурно-геологической основы, характеризующей состояние Бурейского оползневого узла *до начала* события, использована карта новейшей окраинно-континентальной структуры Востока Азии с данными по сеймотектонике [3] и геологическая карта района оползня масштаба 1:50 000 [2]. Сам узел был закрыт маршрутами с детальной документацией представительных обнажений. Все фото в статье выполнены автором, за исключением двух детальных снимков верхней (южной) стенки отрыва оползня, представленных в его распоряжение Д.Силантьевым.

Информативности проведённых наблюдений способствовала хорошая обнажённость территории, обеспечившая сохранность следов, оставленных в ходе оползнеобразования и на его подготовительных стадиях. Снежный покров во время экспедиции не превышал первых сантиметров. В данном случае помогла волна «цунами», очистившая большую часть изучаемой площади от растительности и ранее выпавшего снега. За границей её действия мощность снега достигала 0,5 м. Однако после образования оползня установилась необычно малоснежная для этих мест погода: снегопадов до конца экспедиции здесь не было. Обработка полученных полевых материалов дополнялась дешифрированием космоснимков мониторинговой системы Дальневосточного центра ФГБУ НИЦ «Планета».

**Результаты работ.** *Позиция Бурейского оползня в региональной структуре* определяется его приуроченностью к юго-восточной части Мельгинского

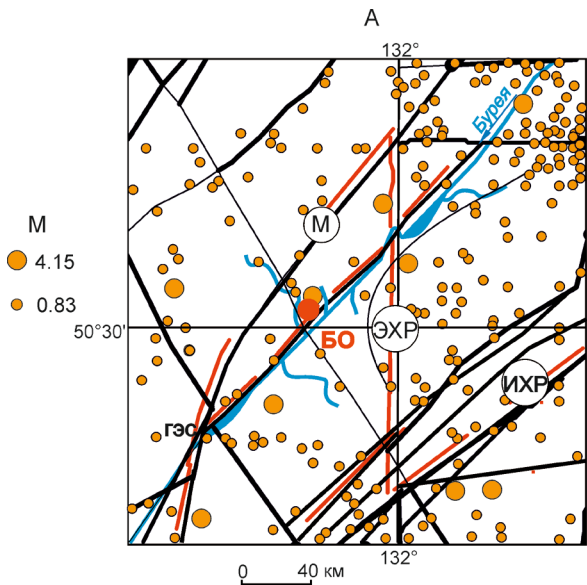


Рис. 3. Фрагмент карты сейсмоструктоники окраинно-континентальной структуры Востока Азии [3–5] с позицией Бурейского оползня (БО) в узле сочленения Мельгинской (М), Эхилкан-Ханкайской (ЭХК) и Инкоу-Хинганской (ИХК) зон глубинных разломов:

красным помечены разломы с признаками активности в голоцене; эпицентры землетрясений (оранжевые кружки) взяты из каталога землетрясений России по состоянию на 2013 г. [10]

блока Буреинского массива – реликта протоплатформы в окраинно-континентальной структуре Востока Азии (рис. 3). Вмещающая оползень геологическая структура была активизирована в конце новейшего этапа сдвиговыми системами глубинных разломов: меридионального Эхилкан-Ханкайского и разломов северо-восточной ориентировки – Инкоу-Хинганского и Мельгинского. Долина Буреи вложена здесь в структуру сравнительно локального северо-восточного разлома, относящегося к Инкоу-Хинганской зоне. Мельгинский блок был расколот этим разломом в начале голоцена с взбросом его южного борта. На молодость разлома указывает *транзитный* характер Буреи на этом участке с руслом, глубоко (до 70 м) врезанным в крепкий скальный субстрат. О его молодости свидетельствует и насыщенность реки порогами, скрытыми после подъема уровня воды с образованием Бурейского водохранилища. Разлом усложнен ещё более молодыми кулисообразными смещениями по нарушениям меридиональной и северо-западной ориентировки, с амплитудой до 3,5 км. На оползневом фрагменте русло Буреи вложено в его широтную кулису.

Контролирующий оползень структурный узел, судя по карте М.В.Мартынюка [8], образован гранодиоритами палеозоя. Субстрат самого оползня, по данным полевых наблюдений, сложен в разной степени гранитизированными мета-андезитами протерозоя с прорвавшей их экструзией граносиенит-порфиров и дайками кислого-щелочного состава, вероятнее всего, мелового возраста. На рис. 4, А, Б показана ситуация оползневой узла до схода оползня. Рис. 4, В иллюстрирует состояние узла после события и во время полевых наблюдений.

*Поперечный профиль* русла Буреи на участке оползня (см. рис. 4, Б и В) *асимметричен*: с пологим северным бортом и крутым (прилегающим к разлому) южным. Блок *северного борта* – низкий, абсолютные отметки его поверхности не превышают 250 м. Сложен он мета-андезитами, проработанными с поверхности кайнозойской корой выветривания и палеоврезами, выполненными лимонитизированными пролювиальными осадками, вероятнее всего, плейстоценового возраста. Все вместе они были деформированы молодой (ранне-голоценовой) тектоникой.

Высокий, прилегающий к разлому *южный борт* отличается более контрастным рельефом с абсолютными отметками поверхности, повышающимися к водоразделу до 500 м, и уклоном 30–35°. В приводораздельной, более пологой части на нём лежит плащ рыхлых песчано-глинистых элювиально-делювиальных плейстоценовых осадков, под которым могла сохраниться и кора выветривания. В самом конце новейшего этапа этот борт был, очевидно, взброшен по отношению к северному борту Буреи с амплитудой около 200 м. О молодом возрасте взброса говорит наличие упомянутого, сохранившегося от эрозии плаща осадков плейстоцена.

Восточнее оползневой узла на топокарте (см. рис. 4, А) в русле реки, вблизи её южного борта, виден небольшой остров, сложенный сланцами протерозоя [8]. Судя по всему, этот остров (как и упомянутые выше пороги) – след более раннего скального оползня. Бурейский оползень, похоже, был здесь не первым. Сейчас этот остров также скрыт под водой. Топокарта и геологическая карта были составлены ещё задолго до появления Бурейского водохранилища.

Бурейская оползневая система, как отмечалось, оставила после себя *следы нескольких взаимосвязанных процессов* – собственно оползнеобразования, волны «цунами», возвратной волны и серии тектонических деформаций. Следы оползня, представленные собственно оползевым телом и его цирком, выражены наиболее ярко. *Оползневое тело* (см. рисунки 5 и 4, В) заполнило русло Буреи с выходом на её северный борт. Площадь надводной части



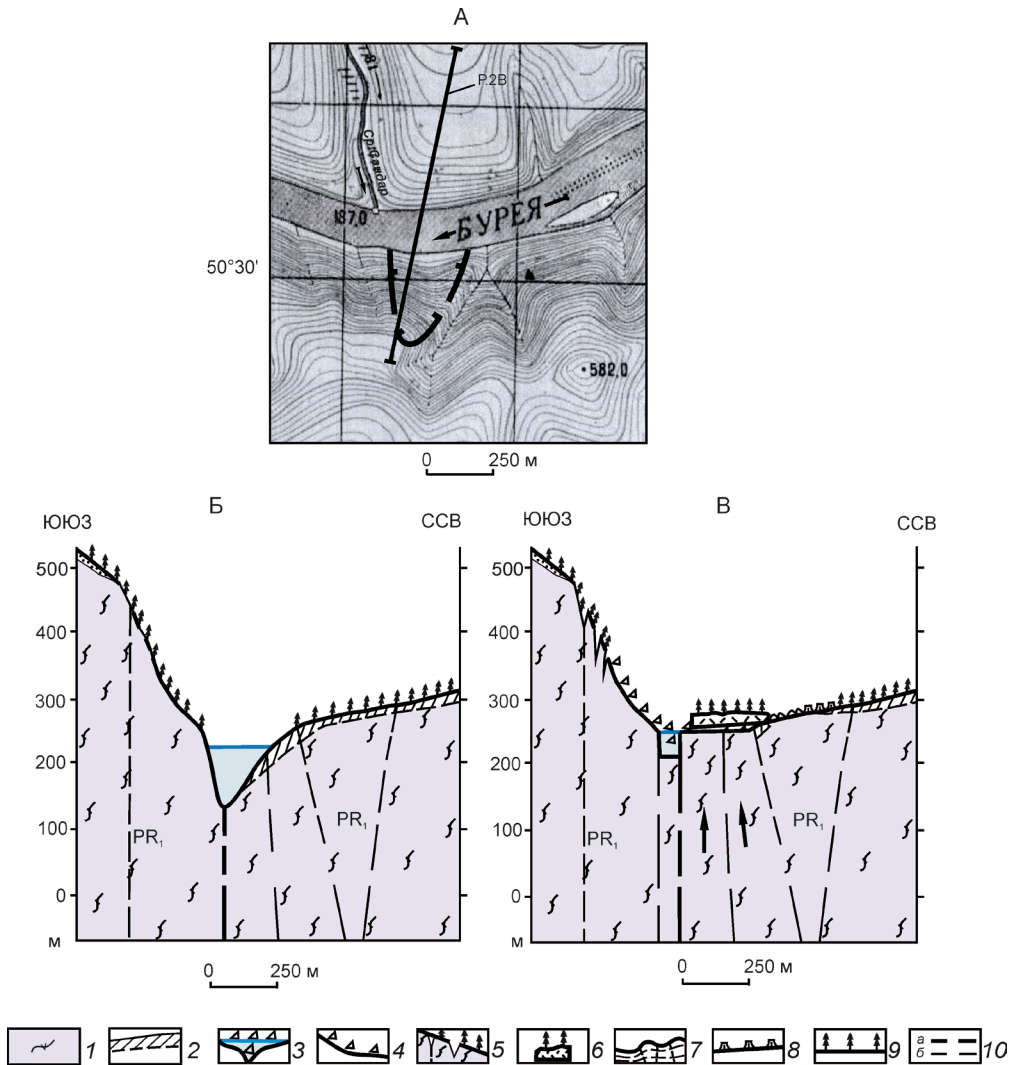


Рис. 4. Структура Бурейского оползневого узла:

А – топокарта района оползня (чёрный контур) до события, с линией геологического разреза; Б–Б' – геологические разрезы оползневого узла: Б – до схода оползня, Б' – во время наблюдений; 1 – мета-андезиты протерозоя; 2 – кайнозойская кора выветривания; 3 – оползневое тело в русле (голубое) с перемычкой (без цвета); 4 – остаточный шлейф оползня в нижней части цирка; 5 – тыловая часть оползня в верхней части цирка; 6 – оползневая пластина на северном борту Буреи; 7 – структура «бульдозинга»; 8 – след «цунами» со срезанным лесным покровом; 9 – ненарушенная «цунами» поверхность; 10 – разломы: а – основной, контролирующий русло Буреи, б – прочие

оползня – около 200 000 м<sup>2</sup>, протяжённость по меридиану – до 900 м, по широте – до 500 м. Общий объём оползневого тела, исходя из морфологии оползневого цирка, параметров русла Буреи и высоты западной стенки отрыва оползня, не превышающей 25 м, составляет примерно 5 млн. м<sup>3</sup>. Объём его надводной части – около 2 млн. м<sup>3</sup>. Более высокие оценки объёма тела оползня связаны, по мнению автора, с включением в него «бульдозинговой» структуры.

У южного борта, где глубина реки максимальна, тело оползня просажено. Оно было представлено уз-

кой (около 200 м) *перемычкой* (см. рис. 5, Б), возвышавшейся над поверхностью подпруженной ею восточной части Буреи на 8–10 м, а над низкой западной – до 15 м. Перемычка сложена обломками свежих, массивных мета-андезитов размером от 10 см до 3 м. Через неделю после проведения экспедиции перемычка была взорвана.

Северная часть оползня представлена *пластиной граносиенит-порфиров* размером 350×250 м, мощностью не менее 25 м (см. рис. 5, В). Эта пластина, являющаяся фрагментом экструзивной постройки меловых

вулканитов, сместилась с южного борта Буреи. Её следы сохранились на востоке оползневого цирка в виде хорошо выраженной на космоснимке кольцевой структуры (см. рис. 5, А). Пластина внедрилась в коренные породы северного борта, а её южная часть перекрыла русло реки, сузив его более чем наполовину по сравнению с ситуацией до схода оползня. Это хорошо видно при сравнении космоснимков за 9 и 13 декабря 2018 г. (см. рисунки 5, А и 9, А).

Несмотря на почти километровое перемещение, пластина сохранила свою целостность и залегает при этом горизонтально. «Висячий» характер её южной, перекрывшей русло части говорит о том, что она лежит на довольно устойчивом основании. Поверхность пластины покрыта лишь незначительно нарушенным лесным покровом. На рис. 5, В видно, что небольшие деревья стоят на ней вертикально. Все крупные деревья наклонены к юго-западу, и лишь немногие из них сломаны. Наклоном деревьев обозначено северо-восточное направление смещения пластины. Отмеченная ненарушенность лесного покрова пластины свидетельствует о её относительно медленном перемещении в этом зажатом во времени оползневом событии и о его сложной организации.

Воздействие столь крупного, массивного тела на поверхность северного борта Буреи сопровождалось «бульдозингом» пород его поверхностной части с формированием на периферии пластины грубо-волновой деформационной структуры (см. рис. 5, Г). Близкие по характеру структуры развиваются на фронте надвига. На северо-западе «бульдозинговая» структура практически перекрыла приустьевую часть Среднего Сандара. Сложена она обломками размером до многометровых глыб в разной степени выветрелых и деформированных ранее новейшей тектоникой (до брекчий) мета-андезитов (см. рис. 5, Д–Е), также глыбами рыхлых окисленных грубо-обломочных осадков, образованных плейстоценовыми временными потоками (см. рис. 5, Е). Состав и размеры этих глыб достаточно однозначно указывают на их *местную* природу. «Длинное» перемещение таких механически неустойчивых пород с южного борта Буреи неизбежно привело бы к их полной дезинтеграции.

Здесь необходимо отметить ещё одну важную особенность формирования Бурейской оползневой системы – пластина с лесом и структура «бульдозинга» *наложены на поверхность, уже проработанную «цунами»*. Вся периферия пластины и зона «бульдозинга», в том числе, полностью лишены лесного покрова и почвенного слоя. К этой особенности мы ещё вернемся.

**Цирк оползня** (рис. 6, А) шириной около 500 м у границы с руслом реки сужается к его верховьям.

До центра склона его поверхность покрыта в основном обломками свежих, массивных, не затронутых выветриванием мета-андезитов. Размер обломков от сантиметров до 3–5 м (см. рис. 6, Б–В). Это *остаточный оползневой шлейф*. Многие из его глыб несут выраженные следы гранитизации – гнёзда, жильные выделения и скопления кристаллов плагиоклаза и калишпата. Судя по всему, это результат воздействия на мета-андезиты палеозойских гранитоидов, выходы которых получили широкое развитие на периферии оползневого узла. Дезинтегрированный характер обломочного материала этой части оползневой шлейфа говорит о воздействии на субстрат оползня мощного *импульса сжатия с интенсивным «сухим» дроблением* его пород.

Другой важной особенностью оползневого цирка является ярко выраженная *асимметрия*. У его западной стенки поверхность остаточного оползневой шлейфа просажена, а к восточной стенке она полого поднимается к самой её вершине. Это указывает на то, что материал оползня перемещался не только к северу, но и к востоку. Результирующий вектор его перемещения имел, судя по всему, *северо-восточную ориентировку*.

Ближе к вершине цирка в оползневом шлейфе появляются обломки выветрелых пород, а ещё выше – фрагменты смещённого элювиально-делювиального плаща с деформированным лесным покровом (см. рис. 6, Г). Это *тыловая зона оползневой системы* с намного более медленной динамикой. Оползень здесь остановился, только начав свое движение. Верхняя граница оползня (см. рис. 6, Г–Е) трассируется лишь неглубокими (первые метры) крутыми трещинами отрыва, с элементами дуговой в плане формы. На их плоскостях обнажены рыхлые, бурые элювиально-делювиальные осадки плейстоцена.

Боковые стенки оползневой цирка имеют субвертикальную ориентировку. Особенно ярко выражена *западная стенка* (рис. 7). На её плоскости обнажена *раскрытая сдвиг-надвиговая структура* характерного крупночешуйчатого строения (см. рис. 7, А). Субширотное простираение чешуй, круто подвёрнутых к югу и ограниченных открытыми трещинами, указывает на южное направление сформировавшегося их взбросо-сдвига. Развивалась эта структура в конце новейшего этапа: вероятно, в начале голоцена, во время формирования Бурейского разлома, но задолго до оползневого события. Эта раскрытая структура была, очевидно, обводнена, что способствовало «ползучести» оползневой субстрата. *Раскрытость и обводнённость* новейших сдвиг-надвиговых дислокаций – характерная черта Востока Азии [8].

Западная стенка цирка совмещена с *субмеридиональным сдвиговым нарушением*, наложенным на

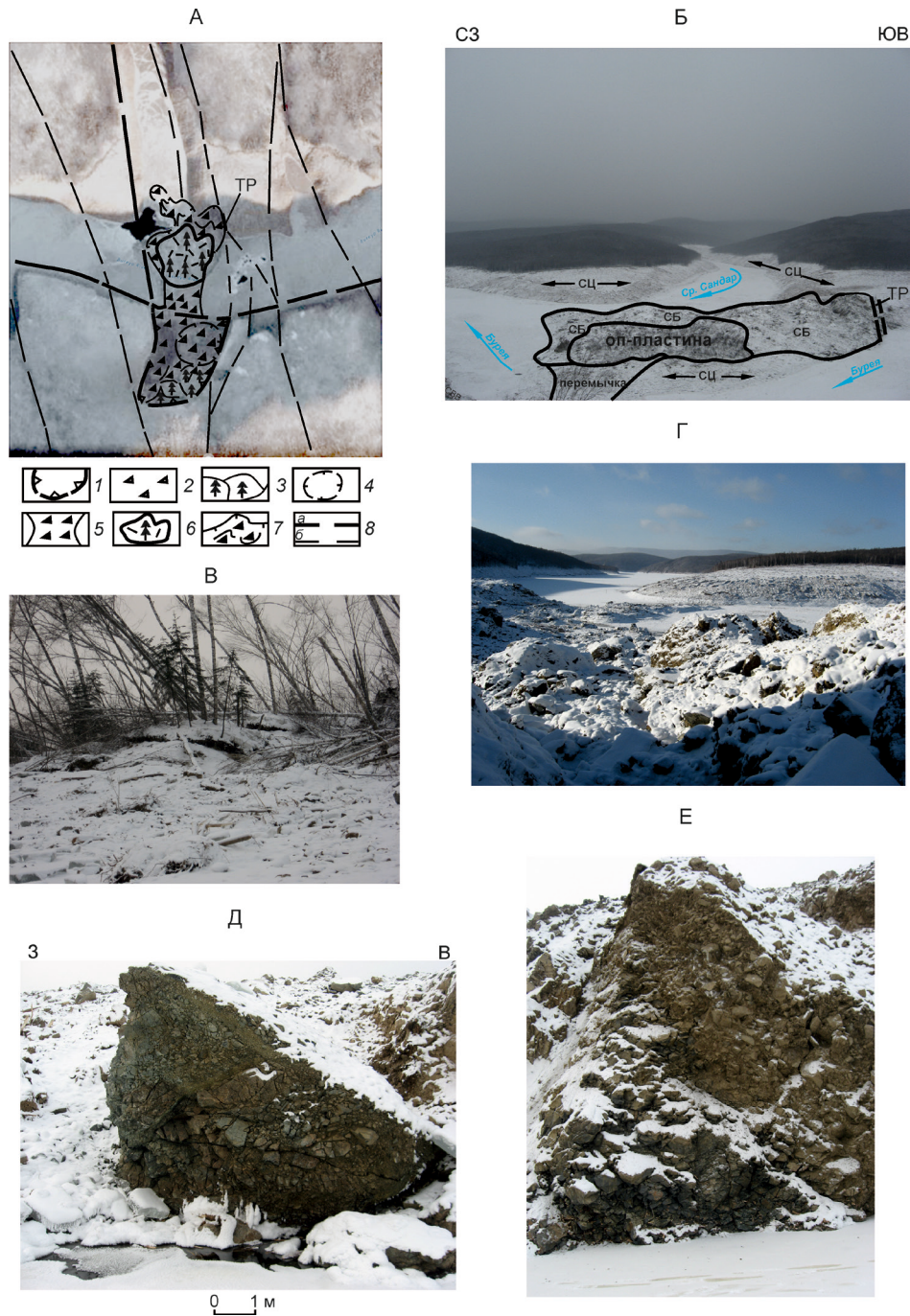


Рис. 5. Внутреннее строение оползневой системы:

А – схема дешифрирования космоснимка 13.12.2018 (см. рис. 1, А): 1 – контур оползневого цирка; 2 – оползневый шлейф нижней части цирка; 3 – тыловая часть оползня в верхней части цирка; 4 – кольцевая структура в цирке – реликт экструзии граносиенит-порфиоров; 5 – оползневая перемычка; 6 – оползневая пластина граносиенит-порфиоров на северном борту Буреи; 7 – зона «бульдозинга» на периферии пластины; 8 – разломы: основные (а) и прочие (б), ТР – структура тектонического рва; Б – северная часть оползневого узла, вид с юго-востока (с восточной стенки цирка): СЦ – след «цунами», оп-пластина – оползневая пластина граносиенит-порфиоров, СБ – структура «бульдозинга», ТР – тектонический ров; В – фрагмент оползневой пластины, вид с юго-востока; на переднем плане обломки тонкого льда и сучьев – след возвратной волны; Г – северо-западная часть структуры «бульдозинга», перекрывшая русло Среднего Сандара; Д–Е – глыбы выветрелых, деформированных до брекчий мета-андезитов (Д) и грубообломочных пролювиальных осадков плейстоцена (Е) в юго-восточной части «бульдозинговой» структуры; в русле у берега – проталины, след температурной аномалии



упомянутую надвиговую структуру непосредственно перед сходом оползня. Это нарушение прослеживается к северу, по долине Среднего Сандара, правого притока Буреи, и хорошо выражено на снимке от 13 декабря (см. рис. 5, А). На притёртой до зеркального блеска плоскости западной стенки видны *две системы борозд скольжения*. Первая (см. рис. 7, Б) имеет горизонтальную ориентировку, соответствующую времени формирования контролирующего её сдвигового нарушения. По поверхности её борозд растёт и лимонит, характерный для зоны поверхностного окисления, которая на Востоке Азии имеет плейстоцен-голоценовый возраст [2]. Вторая система борозд имеет субвертикальную ориентировку (см. рис. 7, В). Она отчётливо наложена на борозды первой системы и была образована, очевидно, непосредственно в момент отрыва оползневой тела.

**Восточная стенка** цирка (см. рисунки 5, А и 7, Г–Е) контролируется западным контактом дайки граносиенит-порфиоров. Линейная, меридиональная, субвертикальная структура этой дайки прослеживается снизу вверх по склону: от берега Буреи почти до вершинной части оползня. После взброса южного блока она на всём своём протяжении была препарирована эрозией. Жёсткая глубинная структура этой дайки в своё время ограничила развитие надвиговых (дооползневых) деформаций к востоку, сконцентрировав их на локальном фрагменте оползневой субстрата, что способствовало наращиванию его НДС. А непосредственно в ходе оползнеобразования экран дайки ограничил выброс дезинтегрированного оползневой материала в этом направлении, определив отмеченную выше *асимметрию* остаточного оползневой шлейфа. В центре склона дайка была при этом деформирована и частично перекрыта оползневой материалом (см. рис. 5, А). Отдельные крупные глыбы мета-андезитов размером до 7 м были выброшены за неё на 10–30 м к востоку (см. рис. 7, Е).

Дезинтегрированность пород оползневой шлейфа и перемычки, асимметрия оползневой шлейфа в центральной и нижней части цирка, выброс крупных глыб за восточную стенку свидетельствуют о *взрывном* характере оползнеобразования. Здесь, судя по всему, имеем не медленный сход, а мгновенный выброс оползневой материала, с полным перекрытием русла Буреи. На исключительно мощную энергетику этого выброса указывает и почти километровое перемещение пластины граносиенит-порфиоров.

**Волна «цунами»**, являясь важной составляющей Бурейской оползневой системы, оставила после себя особенно яркие следы в самом оползневом узле, а также вверх и вниз по берегам Буреи и по её притокам (см. рисунки 8, А–Г и 5, Б). Она полностью сняла

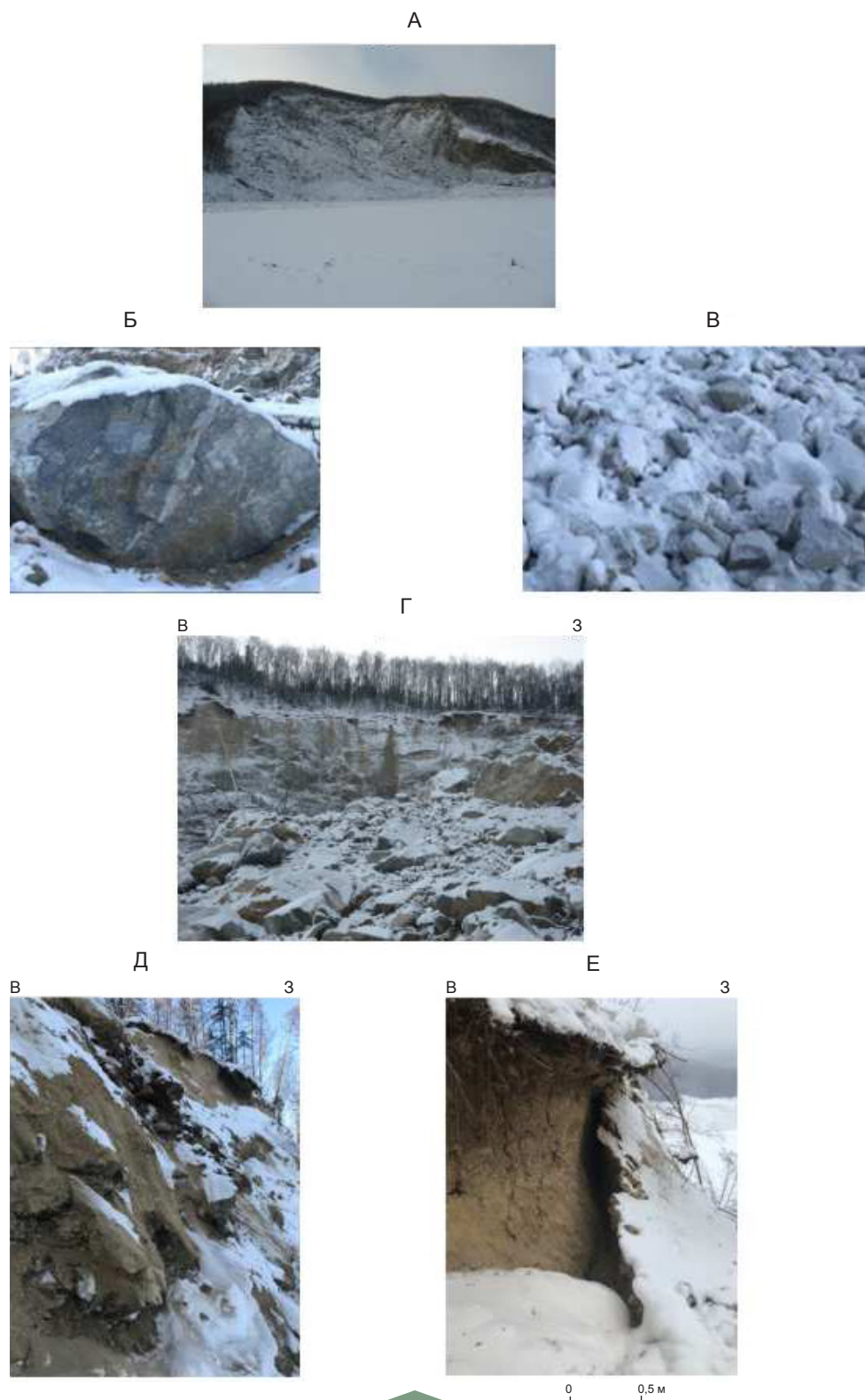
растительный покров, почву, а местами и подстилающий её склоновый делювий (см. рис. 8, Б). На космоснимках и фото её след выражен светлым фототоном. В тыловой зоне «цунами» все деревья (в том числе достаточно крупные) были срезаны ею – от них остались лишь пни высотой не более 40 см (см. рис. 8, В). Верхняя граница (фронт) волны отмечена полосами из обломков стволов деревьев, выброшенных на берега Буреи и её притоков. Вверх по течению Буреи следы «цунами» прослежены на 7 км, вниз – на 4 км. Прилегающие к узлу правые притоки были также захвачены ею на расстоянии до 4 км. Максимально была проработана «цунами» часть оползневой узла на низком северном борту Буреи.

Высокий южный борт был также захвачен «цунами». Здесь высота её волны достигла максимума (не менее 60 м). Хорошо выраженный след она оставила на борту западной стенки оползневой цирка. На рис. 8, Г (также см. рисунки 6, А; 7, А и 8, Г) видно, что западная стенка срезала след цунами. Вместе с приведёнными выше данными по оползневой пластине и структуре «бульдозинга» это указывает на образование «цунами» *до появления Бурейского оползня*. Ситуация выглядит довольно непривычно – принято считать, что волна «цунами» помещается на фронт развития оползня. Это, в частности, иллюстрирует описание близкого по характеру канадского скального оползня, составленное в рамках традиционной модели [7]. Оползень, сошедший 4 декабря 2007 г. в провинции Британская Колумбия у границы с США, сопровождался там «цунами» высотой до 20 м. Формирование «цунами» до образования Бурейского оползня можно объяснить лишь *резким сжатием* русла Буреи под действием локального сдвигового импульса.

Основная часть взломанного «цунами» раннего льда и срезанных ею деревьев, унесённых вверх по течению Буреи, были затем снесены вниз более медленной *возвратной волной* (см. рис. 8, Д–Е). В русле Буреи они были сброшены у перемычки, в зоне около 4 км выше её, и сцементированы с поверхности более поздним льдом. По обоим бортам реки возвратная волна оставила следы в виде обломков сучьев, взломанного «цунами» *тонкого* льда толщиной около 20 см, а несколько выше их – водными заплесками, замёрзшими на проработанном «цунами» породном субстрате. Принесённый возвратной волной тонкий лёд характеризует состояние ледяного покрова реки до события. Ко времени проведения наблюдений толщина льда в русле Буреи в районе оползня достигла 0,5 м и более.

Время прохождения «цунами» вверх по течению Буреи при обычной для неё скорости распространения (100–200 м/сек.) – около 40 сек. Сход возвратной





**Рис. 6. Цирк оползня:**

А – общий вид с северо-востока; Б–В – обломочный материал нижней части остаточного шлейфа оползня; Г – остаточный шлейф в центре цирка (на переднем плане) и тыловая зона оползня с фрагментами смещённого элювиально-делювиального плаща с реликтами лесного покрова (на заднем плане), на верхней границе цирка видны трещины отрыва оползня; Д–Е – трещины отрыва на верхней границе цирка; на плоскости трещин обнажены рыхлые элювиально-делювиальные осадки плейстоцена

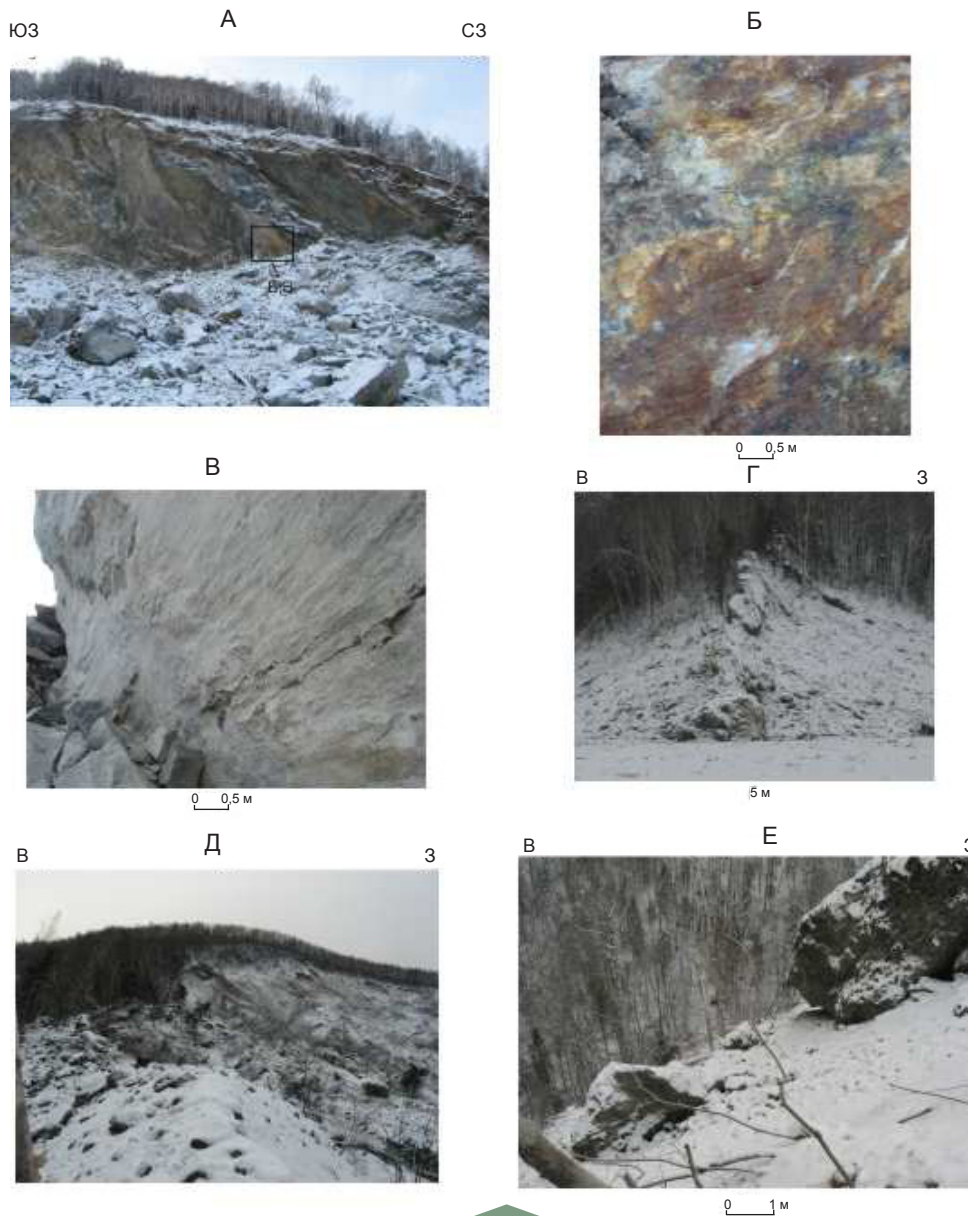


Рис. 7. Стенки отрыва основного тела оползня:

А–В – западная стенка: А – общий вид с северо-востока (видна срезанная стенкой чешуя надвиговой структуры), Б – фрагмент плоскости сдвига, наложенного на материнский субстрат оползня перед началом оползнеобразования (видны горизонтальные борозды на зеркале скольжения с растёртым лимонитом (бурое)), В – субвертикальные борозды скольжения – след отрыва оползневой массы; Г – северная часть дайки граносиенит-порфиров, контролирующей восточную стенку цирка; Д – деформированная оползнем дайка восточной стенки цирка в центральной его части; Е – глыбы мета-андезитов, выброшенные за границу восточной стенки

волны со скоростью примерно на порядок меньше укладывается в интервал 4–5 мин. Все события 12 декабря в оползневом узле ограничены таким образом этими рамками. С ними примерно совпадает и интервал прохождения двух упомянутых выше цугов поверхностных волн.

**Тектоническая составляющая** (см. рисунки 9 и 10). Именно специфика сдвиговой тектоники и

определила характер развития Бурейской оползневой системы. Выше уже были отмечены следы ранних (плейстоцен-голоценовых) сдвиг-надвиговых дислокаций субстрата оползня на его западной стенке, а также след импульсной активизации меридионального разлома, трассирующегося с этой стенки на север, по долине Среднего Сандара. Этот разлом, активизированный непосредственно перед сходом



Рис. 8. Следы «цунами» (А–Г) и возвратной волны (Д–Е) на Буреи:

А – левый борт Буреи выше перемычки, вид с северо-запада (на переднем плане лёд со следами возвратной волны); Б – срезанный «цунами» делювий на левом борту Буреи у границы с цирком; В – пни – остатки срезанного «цунами» леса на правом борту реки, севернее структуры «бульдозинга»; Г – фрагмент следа «цунами», срезанного западной стенкой оползня (на переднем плане открытая вода ниже перемычки – след температурной аномалии); Д–Е – следы возвратной волны выше перемычки; Д – вид с запада (на переднем плане вмороженные в лёд обломки раннего (тонкого) льда, за ними вмороженные в лёд обломки сучьев); Е – то же, вид с юга, на дальнем плане структура «бульдозинга»

оползня, хорошо выражен на снимке от 13 декабря (см. рис. 2, В). Однако его активизация началась несколько раньше, что обозначилось появлением на южном блоке двух восходящих источников, зафиксированных на космоснимке (см. рис. 9, А–Б). Эти источники, индикаторы активизации глубинного флюидопотока, последовательно образовались там

9 и 11 декабря. Они уверенно выделяются на космоснимках.

Следует обратить внимание на довольно необычную ситуацию, представленную на рис. 9, В–Г. Здесь на снимке от 6.12.2018 г. (см. рис. 9, Г) под ещё незамерзшей в то время частью Буреи отчётливо видны два блока, поднявшихся из её русла почти до выхода



на поверхность. На более раннем снимке от 1 декабря 2018 г. (см. рис. 9, В) они не были зафиксированы. Вертикальная амплитуда их взброса, зажатого в интервал менее 5 дней, составила несколько десятков метров. Это, пожалуй, первый прецедент современного, импульсного по сути взбросо-сдвига со столь значительной амплитудой. После появления двух этих блоков немного выше по течению реки на снимке от 9.12.2018 г. отмечено подпруживание двух небольших левых притоков Буреи с наращиванием ледового покрова к их верховьям.

Появление этих странных взброшенных блоков является результатом активизационных (сдвиговых) процессов, непосредственно подготовивших оползневое событие. Смещённая на северный борт Буреи крупная оползневая пластина использовала поднятый восточный блок с перекрывшей его маломощной перемычкой в качестве своеобразного «моста» (см. рис. 3, Г). Этим и объясняются горизонтальная ориентировка пластины и во многом ненарушенность её целостности.

Проведёнными после экспедиции взрывными работами была удалена, судя по всему, лишь рыхлая оползневая перемычка, залегавшая над взброшенным блоком южнее оползневой пластины. На фото (см. рис. 9, Д–Е) видно, что пластина с лесом и монолитный «мост» восточного блока под ней не были затронуты взрывами. Прежний баланс стока реки из-за этого не был восстановлен. Русло Буреи, нарушенное взброшенными блоками и оползневой пластиной, работает в настоящее время на сток лишь своей южной, суженной частью.

На северном блоке оползневого узла, у восточной границы зоны «бульдозинга» ярко выделяется линейная *субмеридиональная структура тектонического рва*, шириной около 9 м (см. рис. 10, А). К северу от русла Буреи она прослеживается до водораздела на расстояние более 100 м. В этом направлении ров постепенно маскируется структурой «бульдозинга». Вверх по полотну рва, с выходом на его склоны, обломками тонкого льда прослеживается след зашедшей в него возвратной волны (см. рис. 10, Б). Полотно рва сложено в основном свежими мета-андезитами, дезинтегрированными до глыб размером до первых метров. Некоторые из них, как и на оползневом цирке, несут следы гранитизации.

Вверх по склону в полотне наращивается количество глыб выветрелых и деформированных (до брекчий) разностей. Западный борт рва, вскрывший структуру «бульдозинга», целиком сложен глыбами мета-андезитов и даек дацитового состава – выветрелых и деформированных (до брекчий). Встречаются здесь также и глыбы рыхлых, лимонитизированных пролювиальных галечников. На восточном

борту рва, в его южной части, вскрыт коренной выход коры выветривания мета-андезитов – глинизированной, проработанной лимонитом и деформированной плейстоцен-голоценовой тектоникой (см. рис. 10, В).

В 20–30 м за восточной стенкой рва, в привершинной части пологого водораздела с выровненной, проработанной «цунами» поверхностью лежат три глыбы размером до 5 м (см. рис. 10, Г). Слагающие эти глыбы мета-андезиты выветрелые и дроблёные. Одна из глыб (см. рис. 10, Д) «опирается» на пень, а на её боковой поверхности и на вершине лежат вмороженные в лёд обломки сучьев. Некоторые открытые трещины в глыбе также залечены льдом. Пень под глыбой – это, несомненно, след «цунами». А лежащие на ней обломки сучьев и лёд по трещинам – следы возвратной волны. Судя по всему, эти глыбы были выброшены из структуры рва в момент его образования. Причём выброшены они были уже после прохода «цунами» и после формирования структуры «бульдозинга» (или близко к ней по времени), но до возвратной волны.

Природа этого рва, по-видимому, *тектоническая*, поскольку подобные ему по морфологии и размерам сейсмодислокации, изучением которых автор занимается уже почти 20 лет, сопровождают достаточно мощные землетрясения, хорошо выраженные в фиксируемом сейсмостанциями волновом поле. А в пределах Бурейского узла и на его периферии землетрясений во время события, как упоминалось, не было отмечено. Структура контролирующего ров разлома трассируется к югу, на восточную стенку оползневого цирка (см. рис. 6, А).

Развитие Бурейского оползнеобразования было отмечено на сейсмостанциях лишь двумя цугами малоинтенсивных поверхностных волн (см. рис. 1, Б). Первый, наиболее выраженный цуг, характеризующий развитие основной части оползневой системы, зажат примерно в минуту. Он отличается сложным строением. Его левая часть может соответствовать сдвиговому импульсу по меридиональным разломам, сопровождавшемуся резким сжатием бурейского русла с образованием «цунами». Центральная и правая части в таком случае соответствуют дополнительной импульсной активизации разломов, вызвавшей дезинтеграцию скального оползневого субстрата и выброс оползневого материала. Второй, самый невысокий по интенсивности цуг, оторванный от первого на 4 мин. 25 сек., можно привязать к моменту встречи фронта возвратной волны с оползневой перемычкой.

Отмеченная Л.С.Крамаревой с соавторами температурная аномалия [7], появившаяся во время оползнеобразования, является дополнительным индикатором

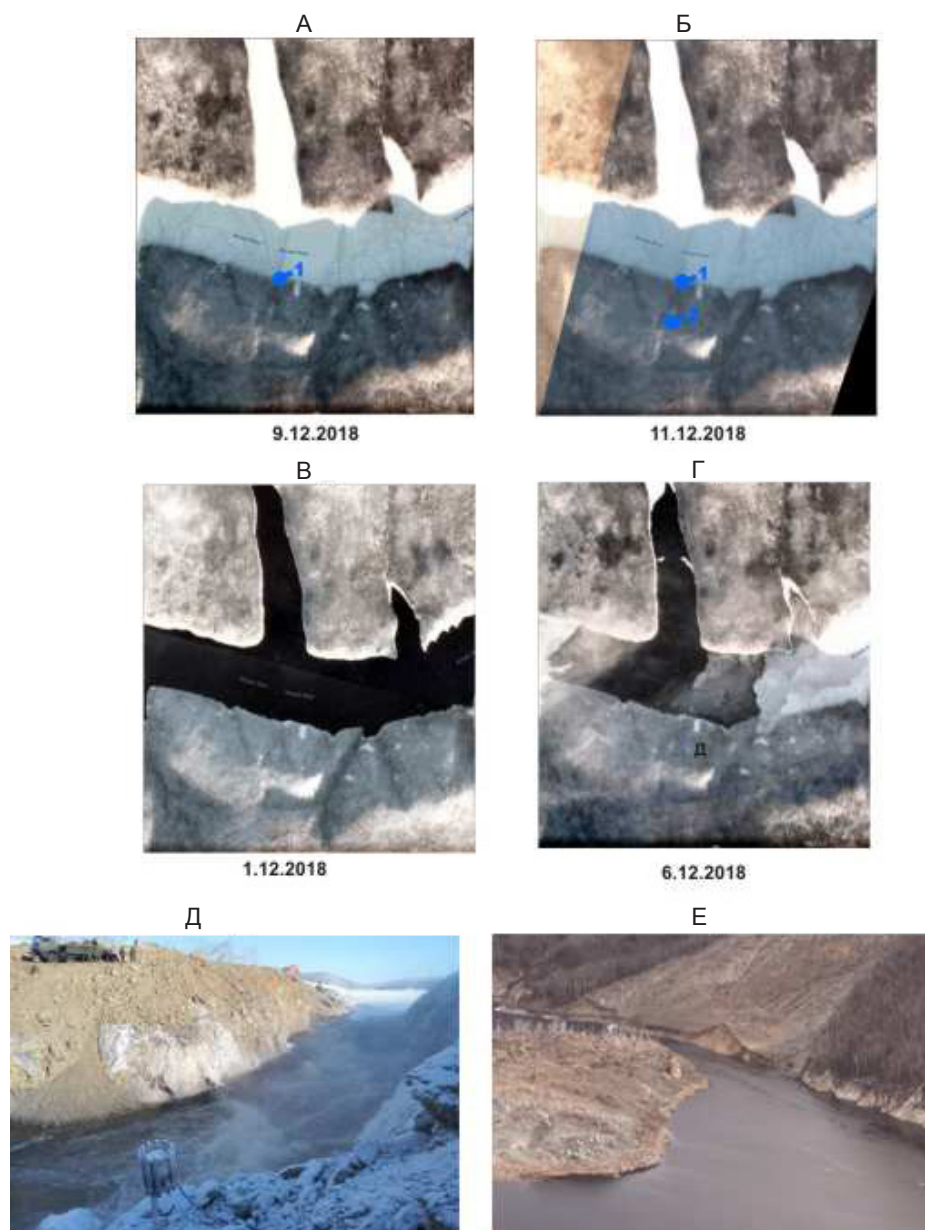


Рис. 9. Следы импульсной активизации разломов Бурейского узла:

А–Б – активизация разлома у западной стенки оползневой структуры, выраженная появлением в нём восходящих источников 9–11.12.2018 г. (1, 2), <https://www.planet.com/explorer/>; В–Г – «всплывшие» в русле Буреи блоки, 1–6.12.2018 г., <https://www.planet.com/explorer/>; Д–Е – ситуация русла Буреи после взрыва перемычки (Д – зима, Е – лето), на северном борту видна не затронутая взрывом пластина с лесом, <https://yandex.ru/images/search>

тором активизации контролирующей его сдвиговой системы. Она вполне соответствует высокой энергетике этой активизации. Следы этой аномалии сохранились и через месяц после события, во время проведения экспедиции. В русле ниже перемычки, на пересечении со структурой меридионального разлома, контролирующего западную стенку оползня (см. рис. 8, Г) виден крупный участок открытой воды. Неболь-

шая промоина сохранилась во время наблюдений и вдоль северного борта реки под структурой «бульдозинга» и выше перемычки (см. рис. 5, Д).

**Заключение.** Приведённые здесь результаты изучения Бурейской оползневой системы обозначили её весьма сложноорганизованный характер с определяющим влиянием импульсной сдвиговой тектоники на подготовку и ход оползнеобразования.

Структура оползневого узла во время полевых наблюдений представляла собой весьма сложную, интерферируемую картину. Тем не менее, сформировавшие её процессы оставили после себя достаточно выраженные, уверенно идентифицируемые следы. Анализ взаимосвязей этих следов позволил наметить следующую последовательность развития Бурейского оползня:

1. Подготовительная стадия с заложением структуры оползневого узла. Формирование контролирующего этот узел Бурейского разлома и осложняющих его разломов преимущественно меридиональной ориентировки. Взброс южного блока и образование в нём сдвиг-надвиговой структуры с высоким уровнем напряжённо-деформированного состояния. Вероятнее всего, время подготовки – ранний голоцен.

2. Сравнительно медленный импульс активизации сдвиговой системы оползневого узла с взбросом двух блоков в русле Буреи. Активизация глубинного флюидопотока с появлением восходящих источников в меридиональном разломе, контролирующего далее образование западной стенки оползневого цирка. Время проявления 6–11 декабря.

3. Локальный сдвиговый импульс по субмеридиональным нарушениям, сопровождающийся резким сжатием бурейского русла; образование волны «цунами». Данная стадия отмечена входом первого цуга поверхностных волн. 12 декабря.

4. Дополнительная импульсная активизация сдвиговой системы Бурейского узла с дезинтеграцией оползневого субстрата, взрывной выброс оползневого материала к востоку и северу с заполнением русла. Время +40 сек. по отношению к стадии 3

5. Несколько более медленный сдвиговый импульс с выбросом оползневой пластины на северный борт Буреи. Образование структуры «бульдозинга» и тектонического рва. Время +10 сек. по отношению к стадии 4.

6. Исход возвратной волны +4–5 мин. по отношению к стадии 5.

Принципиально важным результатом исследований, проведённых на Бурейском оползневом узле, является то, что здесь впервые установлены *проявления голоценовых и современных импульсных сдвиговых деформаций со столь значительной амплитудой*. Для тектоники и геодинамики голоцена это пока единственный прецедент. По мнению автора, выявленные здесь, зажатые во времени сдвиговые деформации являются проявлением *резонанса знакопеременно-сдвиговой (волновой) системы контролирующей этот узел разломов*. Резонансные эффекты характерны для всех волновых процессов. Они довольно хорошо изучены для систем техногенного класса с их жёсткими количественными парамет-

рами. Но исследования резонансов значительно более медленных волновых геологических процессов находятся пока ещё в самой начальной стадии.

Неясной остаётся крайне слабая выраженность в фиксируемом сейсмостанциями волновом поле энергоёмких импульсных процессов, инициирующих и сопровождающих развитие Бурейского оползня. Информации для ответа на этот вопрос пока явно недостаточно.

#### **Выводы:**

- Предложен вариант эволюционной модели Бурейского оползня, основанной на выделении и анализе следов различных процессов. В этой модели его сложноорганизованная, «мгновенно» развивающаяся система развёрнута во времени.

- Выделен основной энергетический источник оползневой системы – импульсная активизация сдвиговой тектоники, сопровождавшаяся резким наращиванием сжатия в оползневом узле.

- В результате этой активизации напряжённо-деформированное состояние южного оползневого блока было доведено до критического уровня с дезинтеграцией оползневого субстрата и выбросом оползневого материала в русло и на северный борт Буреи.

- Установлено, что бурейская «цунами» оторвана во времени от оползня: она прошла до его «схода».

- Русло Буреи под влиянием импульсной активизации сдвиговой тектоники с появлением «всплывших блоков» и последующим смещением оползневой пластины осталось перекрытым более чем наполовину и после взрыва оползневой перемычки.

- Активизация сдвиговой системы оползневого узла является индикатором современной активности разлома, в которое вложено русло Буреи на участке пересечения им жёсткого Мельгинского блока. Соответственно, и на других участках этого разлома, на высоких бортах с крутыми склонами, возможно появление оползневых узлов, подобных Бурейскому.

- Бурейский оползневый узел является уникальным полигоном для изучения сложноорганизованной активизации современных активных разломов.

- Предложенная модель Бурейской оползневой системы выглядит нетрадиционной и сложной из-за используемого автором междисциплинарного подхода к исследованию и во многом из-за того, что в оползневедении сформировался устойчивый стереотип «не замечать» тектонические (и сейсмогенные) деформационные процессы, инициирующие оползни.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Института тектоники и геофизики им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН при частичном финансировании программой «Приоритетные научные исследования в интересах комплексного развития Дальневосточного отделения РАН» (проект 18-5-024).*



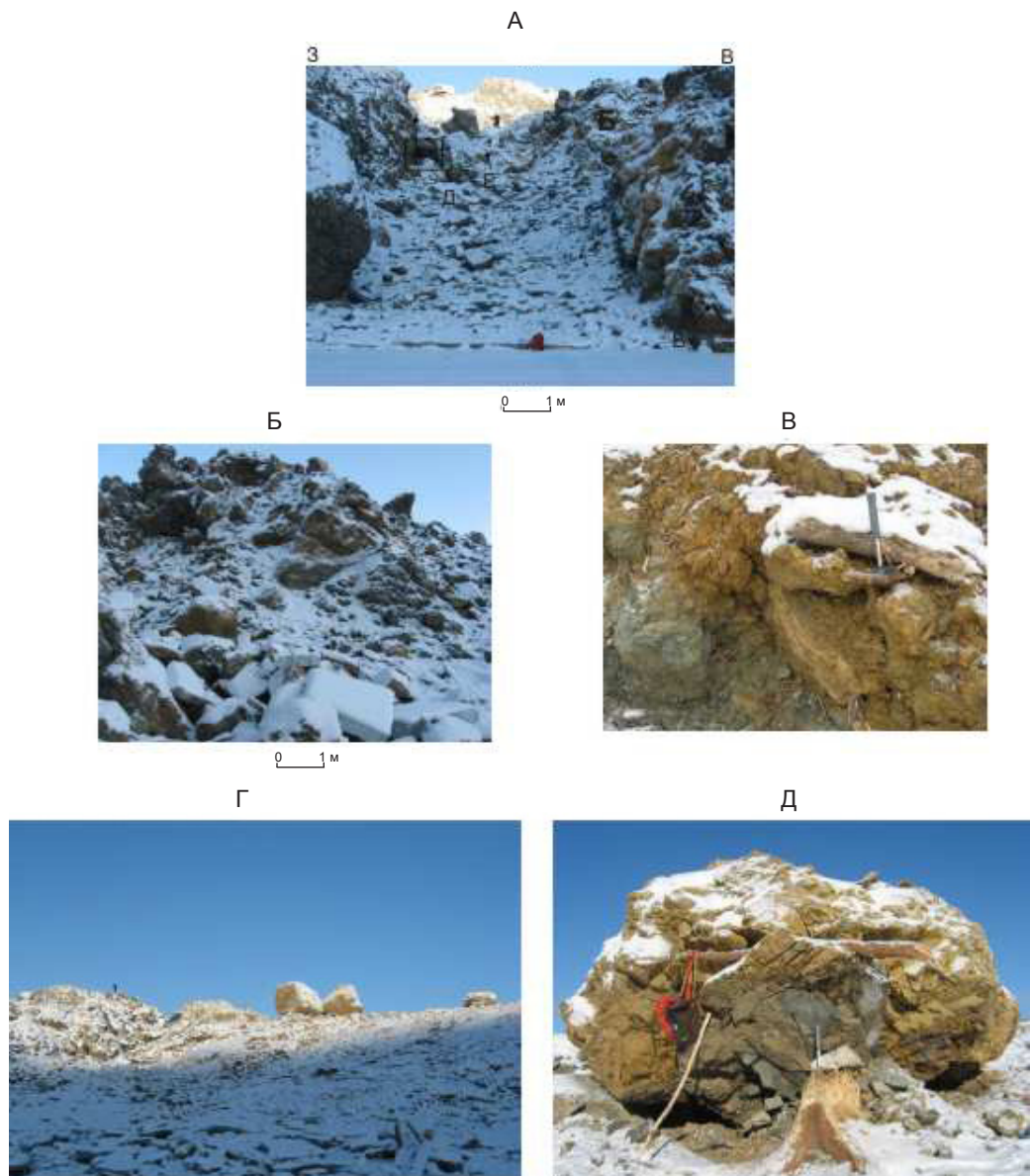


Рис. 10. Структура тектонического рва:

А – общий вид с юга; Б – восточный борт в центре рва (на переднем плане видны обломки тонкого раннего льда – след возвратной волны); В – деформированная кора выветривания мета-андезитов на восточном борту рва, в его южной части (вид с юго-запада); Г – глыбы выветрелых, дроблёных мета-андезитов на восточной стенке рва; Д – восточная (правая на Г) глыба со следами возвратной волны

Автор выражает благодарность заместителю директора по науке ИВЭП ДВО РАН, доктору географических наук А.Н.Махинову и другим сотрудникам этого института, принимавшим участие в экспедиции, за доверительность и взаимопонимание. Автор

благодарит сотрудницу лаборатории «Сейсмологии и сеймотектоники» ИГиГ Н.В.Сатонину за подготовку электронных версий рисунков. Особая благодарность ВРИО директора ИГиГ ДВО РАН В.Г.Быкову за поддержку исследований по Бурейскому оползню.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев В.И.* Геологическая карта СССР. Масштаб 1: 200 000. Серия Хингано-Буреинская. М-52-ХVIII // Под ред. С.А.Музылева. – Хабаровск: Дальневосточное геологическое управление, 1959.
2. *Кокочкин А.А.* Геодинамическая модель кайнозойского этапа развития континентальной коры юга Дальнего Востока России и уран-полиэлементное рудообразование // Автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. – М.: РИС ВИМС, 2007. – 50 с.; <http://vak.ed.gov.ru/announcements/geomin/573/>. <http://www.dissertcat.com/>.
3. *Кокочкин А.А.* Особенности новейшего этапа развития зоны Инкоу-Хинганского разлома // Региональная геология и металлогения. – 2016. – № 68. – С. 42–51.
4. *Кокочкин А.А.* Специфика оползнеобразования на рыхлом и скальном субстрате: на примерах оползней Среднего Поволжья и Бурейского оползня // Тектоника, глубинное строение и минералогия Востока Азии. X Косыгинские чтения: материалы Всероссийской конференции с международным участием, 10–12 сентября 2012 г. / Отв. ред. А.Н.Диденко, Ю.Ф.Манилов. – Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН, 2019. – С. 278–280.
5. *Кокочкин А.А.* Эволюция новейшей окраинно-континентальной структуры Намибии и структура-антипод Востока Азии. Опыт междисциплинарного исследования на синергетической основе. – Саратов: Приволжская книжная палата, 2014. – 188с.
6. *Кокочкин А.А., Иванов А.В., Тюленева В.М., Яшков И.А.* Тектоника, сейсмоструктура и гидротермальный метасоматоз в новейшей структуре Волжского (Саратовско-Камышинского) Правобережья: новые данные // Отечественная геология. – 2018. – № 6. – С. 51–66.
7. *Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Амельченко Ю.А.* и др. Наблюдение зоны обрушения сопки в районе реки Бурея 11 декабря 2018 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 7. – С. 266–271.
8. *Мартынюк М.В.* Геологическая карта бассейна р. Талой. Масштаб 1:50 000. – Хабаровск: Дальневосточное территориальное геологическое управление, 1974.
9. *Jiajia Wang, Steven N. Ward and Lili Xiao* // *Geophysical journal*. – 2015. Vol. 201. P. 372–376.
10. <http://www.wdcb.ru/sep/seismology/seismology.ru.html>

## REFERENCES

1. *Vasil'yev V.I.* Geologicheskaya karta SSSR. Mashtab 1:200 000. Seriya Khingano-Bureinskaya. M-52-XVIII [Geological map of the USSR. Scale 1: 200,000. Khingano-Bureinskaya series. M-52-XVIII]. Pod red. S.A.Muzyleva. Khabarovsk, Dal'nevostochnoye geologicheskoye upravleniye publ. 1959.
2. *Kokovkin A.A.* Geodinamicheskaya model' kaynozoyского etapa razvitiya kontinental'noy kory yuga Dal'nego Vostoka Rossii i uran-polielementnoye rudoobrazovaniye [Geodynamic model of the Cenozoic stage in the development of the continental crust of the south of the Russian Far East and uranium-polyelement ore formation]. Avtoref. dis. ... d-ra geol.-miner. nauk. Moscow, RIS VIMS publ., 2007. 50 p.
3. *Kokovkin A.A.* Osobennosti noveyshego etapa razvitiya zony Inkou-Khinganskogo razloma [Features of the latest stage of development of the Yingkou-Khingan fault zone]. Regional'naya geologiya i metallogeniya. 2016. No. 68. P. 42–51.
4. *Kokovkin A.A.* Spetsifika opolzneobrazovaniya na rykhлом i skal'nom substrate: na primerakh opolzney Srednego Povolzh'ya i Bureyskogo opolznia [Specificity of landslide formation on a loose and rocky substrate: examples of landslides in the Middle Volga region and Bureya landslide]. Tektonika, glubinnoye stroyeniye i minerageniya Vostoka Azii. KH Kosygin'skiye chteniya: materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, 10–12 sentyabrya 2012 g. / Otv. red. A.N.Didenko, YU.F.Manilov. Khabarovsk, ITiG im. Yu.A.Kosygina DVO RAN publ. 2019. P. 278–280.
5. *Kokovkin A.A.* Evolyutsiya noveyshey okrainno-kontinental'noy struktury Namibii i struktura-antipod Vostoka Azii. Opyt mezhdistsiplinarnogo issledovaniya na sinergeticheskoy osnove [Evolution of the newest continental-marginal structure of Namibia and the antipode structure of East Asia. Experience in interdisciplinary research on a synergistic basis]. Saratov, Privolzhskaya knizhnaya palata publ. 2014. 188 p.
6. *Kokovkin A.A., Ivanov A.V., Tyuleneva V.M., Yashkov I.A.* Tektonika, seysmotektonika i gidrotermal'nyy metasomatоз v noveyshey strukture Volzhskogo (Saratovsko-Kamyshinskogo) Pravoberezh'ya: novyye dannyye [Tectonics, seismotectonics and hydrothermal metasomatism in the newest structure of the Volga (Saratov-Kamyshinsky) Right Bank: new data]. Otechestvennaya geologiya. 2018. No. 6. P. 51–66.
7. *Kramareva L.S., Lupyan Ye.A., Amel'chenko Yu.A.* et al. Nablyudeniye zony obrusheniya sopki v rayone reki Bureya 11 dekabrya 2018 goda [Observation of the collapse zone of the hill in the area of the Bureya river on December 11, 2018]. Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. V. 15. No. 7. P. 266–271.
8. *Martynuk M.V.* Geologicheskaya karta basseyna r. Taloy. Mashtab 1:50 000 [Geological map of the river basin Thawed. Scale 1:50 000]. Khabarovsk, Dal'nevostochnoye territorial'noye geologicheskoye upravleniye publ. 1974.
9. *Jiajia Wang, Steven N. Ward and Lili Xiao.* *Geophysical journal*. 2015. Vol. 201. P. 372–376.
10. <http://www.wdcb.ru/sep/seismology/seismology.ru.html>