

УДК 630*424.1:630*423.5(235.222)

ОЦЕНКА МЕТОДОВ ДЕНДРОИНДИКАЦИИ ПРИ ДАТИРОВАНИИ ЭКЗОГЕННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОШЛОГО В ВЕРХОВЬЯХ р. АКТРУ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

© 2021 г. С. А. Николаева^а, *, Д. А. Савчук^а, **

^аИнститут мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

*e-mail: sanikol1@rambler.ru

**e-mail: savchuk@imces.ru

Поступила в редакцию 28.07.2020 г.

После доработки 27.01.2021 г.

Принята к публикации 02.03.2021 г.

При датировании вызванных экзогенными гравитационными процессами (ЭГП) событий прошлого широкое распространение в настоящее время получили дендроиндикационные методы. Они наиболее информативны на малоизученных горных территориях, где нуждаются в проверке эффективности их использования. Цель — оценить применяемые в дендроиндикационных исследованиях методы датирования таких событий в конкретных горных условиях — верховьях р. Актру (Северо-Чуйский хребет, Горный Алтай) на примере селевого бассейна и лавинного комплекса. Возрастная и анатомическая (засмоленные кольца) индикации позволили выявить и датировать события приблизительно (периоды времени до нескольких десятков лет), травматическая и дендрометрическая — точно (год), недендроиндикационные методы — уточнить их (размеры, вид и год). Комплексное использование всех этих методов способствовало более полному выявлению событий в прошлом, повышению точности и достоверности их датирования. В селевом бассейне за последние 220 лет датировано 13 событий, в том числе 6 селей, 5 лавин, 1 пожар, в лавинном комплексе за последние 65 лет — 20 лавин.

Ключевые слова: дендроиндикация, сель, лавина, годовые кольца, травмы, радиальный прирост

DOI: 10.31857/S2587556621030110

ВВЕДЕНИЕ

Рельефообразующие процессы активно протекают на склонах гор, вызывая массовые перемещения обломочного материала вниз по склону под действием гравитации. Информация об этих событиях для малонаселенных территорий, таких, например, как Горный Алтай, обычно является очень скудной (Абдульмянов, Достовалова, 2012; География..., 1992; Перов, 2012; Ревякин, Кравцова, 1977). Если наблюдения за экзогенными гравитационными процессами (ЭГП) нерегулярные или отсутствуют, то наиболее информативными для выявления и реконструкции прошлых событий в пространстве и во времени являются методы дендроиндикации, основанные на реакции деревьев на ЭГП. В зарубежных публикациях начала XXI в. по сравнению с отечественными представлены новые подходы и методы к сбору дендроиндикационной, или дендрогеохронологической, информации, обработке и анализу ее результатов, предлагаются решения старых методических проблем и поднимаются новые (см. обзор в Николаева, Савчук, 2020). Большинство тематических исследований прове-

дены для отдельных горных территорий, существенно различающихся по рельефу, климату, ЭГП и растительности, поэтому эти методы нуждаются в проверке в других районах.

Цель статьи — оценить применяемые в дендроиндикационных исследованиях методы датирования прошлых событий, вызванных ЭГП, в конкретных горных условиях — верховьях р. Актру (Северо-Чуйский хребет, Горный Алтай). В статье сделан акцент на методическом аспекте датирования селевых и лавинных событий, главным образом, на ограничениях используемых методов, проблемах их применения.

Подготовительный этап дендроиндикации ЭГП включает подбор модельных участков недендроиндикационными методами: (1) анализ изображений выбранной территории, особенностей ЭГП, а также факторов, способствующих их активизации; (2) анализ характеристик растительности как индикатора ЭГП; (3) сбор свидетельств о явлениях ЭГП на склонах; (4) сбор и анализ дополнительной информации (Николаева, Савчук, 2020).

Верховья р. Актру расположены на северном макросклоне Северо-Чуйского хребта. Это средне- и высокогорная территория с долинными ледниками и асимметричными склонами, что влияет на характер идущих ЭГП и, как следствие, частоту и мощность склоновых явлений. Склоны сложены достаточно быстро разрушающимися породами, большое количество обломков которых накапливается в виде конусов (Душкин, 1974; Титова, Петкевич, 1964). Анализ литературы показал, что здесь, в пределах горно-ледникового бассейна, выделено 37 осыпей, 51 лавинный и 17 селевых очагов [см. (Николаева и др., 2017а, б)]. Северо-Чуйский хребет относится к районам со средней степенью селевой опасности, а генезис большинства селей дождевой (Перов, 2012), с высокой лавинной опасностью (средне- и высокогорье) и со средними объемами лавин (География..., 1992; Ревякин, Кравцова, 1977). В верхнем ярусе гор сумма осадков достигает более 1000 мм за счет переноса снега через хребты. В результате образуется снежный покров, достигающий в зонах зарождения селей/лавин 3–5 м, что является одним из факторов лавинной и селевой опасности (Душкин, 1974; Ревякин, Кравцова, 1977).

Верховья р. Актру делятся на ледниковую и приледниковую зоны (Душкин, 1974; Титова, Петкевич, 1964). В первой зоне деревья отсутствуют, во второй, где проводилась дендроиндикация селей и лавин, — по днищу долины и в нижних частях склонов произрастают фоновые леса (2100–2300 м над ур. м.). Это (1) старовозрастные леса из кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), разделенные конусами выноса на отдельные фрагменты, и (2) сплошные из лиственницы, пройденные пожарами. Выше них (до 2500 м) расположены единичные деревья и их группы (Timoshok et al., 2016).

Анализ имеющихся картосхем, аэрофотоснимков, спутниковых изображений верховьев р. Актру за разные годы и литературы показал смешанный генезис большинства конусов выноса (Николаева и др., 2017а, б). Здесь по сравнению с другими горными территориями селевые бассейны и лавинные комплексы относятся к склоновым [по (Перов, 2012)]. Они имеют относительно небольшие размеры и простое строение с тремя зонами: зарождения (очаг), транзита (лоток/русло/трек/канал, а также террасы и гряды/валы вдоль русла) и аккумуляции (конус выноса) (Душкин, 1974; Николаева и др., 2017а, б).

На основе геоморфологических (География..., 1992; Душкин, 1974; Перов, 2012; Ревякин, Кравцова, 1977; Титова, Петкевич, 1964) и фитоиндикационных (Горчаковский, Шиятов, 1985; Ревякин, Кравцова, 1977) признаков разных ЭГП, а также сведений из литературных источников (Ба-

рашкова и др., 1986; Душкин, 1974), информации из сети интернет, свидетельств очевидцев и собственных полевых наблюдений (Николаева и др., 2017а, б) на левом склоне недалеко от географической станции Томского госуниверситета (50°04' с.ш., 87°45' в.д., 2150 м) подобраны селевой бассейн и лавинный комплекс, где преобладает один тип ЭГП и достоверно известны даты некоторых прошлых событий. В селевом бассейне зафиксированы сходы крупного селя 1984 г. (Барашкова и др., 1986) и мелких лавин 2013, 2016–2018 гг. (очевидцы), в лавинном комплексе [№ 9 по (Душкин, 1974)] — лавин 1966 г. (Душкин, 1974), 2009, 2017 и 2018 гг. (очевидцы).

Дополнительные сведения включали (1) анализ растительности (фитоценотическая индикация) для выделения зон с различной частотой событий в селевом бассейне и лавинном комплексе (Николаева, Белова, 2017), (2) анализ слоев селевых отложений (седиментационно-стратиграфическая индикация) для идентификации крупных селей в селевом бассейне (Николаева и др., 2017а), (3) время гибели (радиоуглеродный метод) кедра (Ивановский, 1983), которое было проверено с учетом (Галахов и др., 2005; Назаров и др., 2016), для датирования одного из селевых слоев.

Таким образом, применение недендроиндикационных методов позволило из множества селевых бассейнов и лавинных комплексов в верховьях р. Актру подобрать два, где преобладает один из типов ЭГП: сель или лавина.

Во время **полевых работ** для сбора репрезентативного материала проводится (1) идентификация на местности прошлой селевой/лавинной активности и выбор модельных участков склона, (2) отбор и картирование нарушенных¹ внешними воздействиями и ненарушенных (контроль) деревьев, (3) набор необходимого количества деревьев, (4) учет разных типов нарушений у деревьев, (5) выбор вида древесного образца и высоты его отбора на стволе (Николаева, Савчук, 2020).

На выбранных в верховьях р. Актру селевом бассейне и лавинном комплексе подтвердился один преобладающий тип ЭГП: сель или лавина. Для сбора полевого материала обследовались те участки на них, где произрастают деревья (модельные участки).

Первый модельный участок (рис. 1, 1) охватывает нижнюю часть зоны транзита и зону аккумуляции селевого бассейна. На поверхности конуса

¹ Под нарушенными (disturbed) деревьями, вслед за зарубежными исследователями (в отечественной литературе адекватный термин отсутствует), мы понимаем деревья, имеющие не только механические нарушения их целостности (травмированные), но и изменения в форме роста ствола (наклоненные, изогнутые) или условий их произрастания (с засыпанными основаниями стволов, освещенные из-за гибели соседних деревьев) [подробнее см. (Николаева, Савчук, 2020)].



Рис. 1. Внешний вид модельных участков в верховьях р. Актру (Горный Алтай): (1) первый селевой и (2) второй лавинный. К — массив леса с контрольными деревьями. Дата съемки — 20 июня 2018 г.

выноса (высота 2150–2240 м, площадь 9.3 тыс. м², угол наклона 15°, мощность 0.2–0.8 м) хорошо выделяются селевые русла и валы из обломочного материала. На конусе произрастает сомкнутый кедровый лес с развитыми нижними ярусами. Анализ отложений показал, что основным фактором его формирования были сели. Нижняя часть зоны транзита имеет форму вреза (глубина до 1.8 м и ширина до 3 м) в делювиальные отложения, незначительно заходящего в массив леса. Растительность в русле временного водотока разреженная и представлена травами и кустарниками (Николаева, Белова, 2017; Николаева и др., 2017а), на валах вдоль русла и террасах — единичными деревьями лиственницы, крупным подростом лиственницы и кедра и густым травяно-кустарниковым покровом. Здесь в отличие от конуса выноса обнаружены следы схода весенних лавин: до конца второй декады июня 2018 г. сохранились остатки снега в русле и на валах, в середине июля 2017 г. — свежий обломочный материал, недавно погибшие и травмированные особи крупного подроста хвойных и кустарников на валах и террасах.

Второй модельный участок (см. рис. 1, 2) охватывает среднюю и нижнюю части конуса выноса лавинного комплекса (2150–2280 м, площадь 86 тыс. м², угол 15°). На конусе прослеживаются лавинные лотки с характерными валами, состоящими из обломочного материала. Его поверхность покрыта густой травяной и кустарниковой растительностью с единичными травмированными деревьями (Николаева, Белова, 2017; Николаева и др., 2017б). Конус по периферии окружают кедровые и лиственничные леса с травяным покровом.

Для дендроиндикации селей/лаvin из четырех известных способов отбора нарушенных деревьев (целенаправленный, по трансектам, метод сетки и случайный (Chiroiu, 2013)) обычно применяется первый (Trappmann et al., 2013). В верховьях р. Актру целесообразность применения целенаправленного способа отбора деревьев на модельных участках обусловлена (1) простотой строения и относительно небольшими размерами селевых бассейнов и лавинных комплексов и (2) неравномерным распределением нарушенных деревьев

Таблица 1. Характеристика собранного материала

Участок	Год сбора материала	Количество деревьев	Количество древесных образцов*	Длина рядов, годы	Время и место появления основных поколений деревьев
Преимущественно селевой (I)	2012, 2015, 2017	25	65	2015–1721	1) 1815–1865, зона аккумуляции 2) 1987 и позже, террасы нижней части зоны транзита
Лавинный (2)	2015, 2017, 2018	36	114	2017–1740	1) 1890–1930, периферия конуса 2) 1950–1965, на конусе
Контроль (К)	1999, 2015, 2018	17	32	2017–1871	1) 1632–1661 2) 1870–1890

Примечание. * Каждый древесный образец включает 1 радиус.

между и внутри их зон. Следует отметить, что зоны транзита и верхние части зоны аккумуляции здесь находятся в тундровом поясе (деревья отсутствуют) и/или лесотундровом экотоне (деревья растут одиночно или группами), весь конус выноса или его нижние и средние части – в лесном поясе (сомкнутый или разреженный лес). Эти конусы в селевых бассейнах зарастают лесом, а в лавинных комплексах деревья растут по их периферии и встречаются единично внутри них. Поэтому в селевом бассейне нарушенные деревья отбирались вдоль русла в нижней части зоны транзита и в зоне аккумуляции, в лавинном комплексе – растущие в основном по периферии конуса.

Все отобранные деревья фиксировали на спутниковых изображениях, фотографировали, записывали информацию о них (высота, диаметр, характер и размеры повреждений, качество коры/спилов, наличие соседних деревьев и т.п.).

Такой целенаправленный способ отбора нарушенных деревьев на модельных участках позволил минимизировать влияние других факторов и обеспечить необходимый минимальный объем выборки (табл. 1).

Отбор контрольных деревьев обычно проводится на соседних по отношению к исследуемым участках склона, в динамике прироста которых важно отсутствие сигнала неклиматической природы (Горчаковский, Шиятов, 1985; Шиятов и др., 2000). Поиск контрольных деревьев в верховьях р. Актру проводился на этом же склоне в соседних с модельными участками массива леса. Он был затруднен из-за наличия в этих массивах множества деревьев: (1) нарушенных ЭГП по всей верхней границе леса, (2) поврежденных лесными пожарами, (3) угнетенных из-за конкуренции на сомкнутых участках леса (Николаева и др., 2015, 2018). Тем не менее было найдено 17 деревьев разного возраста (см. табл. 1) в кедровнике (см. рис. 1, К), удовлетворяющих вышеупомянутым требованиям. Синхронность рядов

прироста модельных деревьев с обобщенными хронологиями из более удаленных массивов леса оказалась относительно невысокой, что не позволило использовать последние в качестве контроля.

Типы внешних нарушений (механические повреждения, изменения формы или условий роста дерева), наиболее часто встречающиеся у деревьев в селевых бассейнах и лавинных комплексах верховьев р. Актру, следующие: травма ствола, декапитация вершины (обломы верхних частей ствола и кроны), облом нижних ветвей, надлом или слом ствола у основания, а также засыпание основания ствола обломочным материалом (Николаева и др., 2017б). Оголение корней, наклон/изгиб ствола и снижение конкуренции наблюдались реже.

В современных дендроиндикационных исследованиях в качестве древесных образцов с живых деревьев обычно берут керны, с погибших – спилы/выпилы (Stoffel, Bollschweiler, 2008; Trappmann et al., 2013), что связано с необходимостью получения максимально возможной информации при наименьших причинении вреда окружающей среде и трудозатратах. Поскольку в верховьях р. Актру поддерживается режим, близкий к заповедному, то мы придерживались вышеупомянутого подхода к отбору образцов. С одного дерева обычно брали не менее двух кернов: со стороны воздействующего фактора (через сектор ствола с корой, раной или каллюсной тканью) и с противоположной неповрежденной (контроль). При наличии нескольких травм на стволе количество кернов увеличивалось. Спилов/выпилы брали только с лежащих стволов, пней, погибших верхушек и сучков дерева (Николаева и др., 2017а, б, 2018).

Высота отбора образцов на стволе зависела от наличия засыпанных его участков, изгиба в его основании и травм. У взрослых живых деревьев их брали в местах травм и максимально низко к поверхности субстрата, но выше корневых лап

дерева (от 0.2–0.5 до 2 м), у поврежденного подроста — в основании стволиков, у пней — на высоте слома ствола, у сломанных и упавших деревьев — на сохранившейся части ствола.

Полнота выявления событий в верховьях р. Актру будет относительной, поскольку часть информации неизбежно теряется на этапах отбора нарушенных деревьев (их количество), образцов на дереве (высота отбора и вид образца, их количество), а также низкой сохранности древесины погибших деревьев и т.п. Это объективные ограничения методов, установленные и для других регионов [см., например, (Chiroiu, 2013; Stofel, Bollschweiler, 2008)]. Тщательное выполнение всех вышеизложенных работ на предварительном и полевом этапах исследований позволит повысить полноту выявления и надежность датирования селей и лавин.

Лабораторные методы включают (1) подготовку собранных древесных образцов и измерение ширины годовичных колец на них, (2) перекрестное датирование древесно-кольцевых серий, (3) определение времени воздействия селей и лавин с помощью различных методов дендроиндикации и соответствующих им индикаторов или маркеров (Николаева, Савчук, 2020).

Методы подготовки, измерения древесных образцов и их перекрестной датировки были стандартными (Шиятов и др., 2000). Последняя проводилась путем сравнения ширины годовичных колец древесных образцов, взятых с (1) поврежденных и неповрежденных секторов ствола и ветвей в пределах одного дерева, (2) нарушенных и соседних ненарушенных деревьев одного вида, (3) неповрежденных секторов ствола нарушенных деревьев с контролем. Такие сравнения позволили датировать подавляющее число травм и выявить даты гибели деревьев.

Ниже рассмотрены особенности применения методов дендроиндикации для датирования схода селей и лавин в верховьях р. Актру.

При *травматической дендроиндикации* наиболее часто используемыми прямыми индикаторами событий являются механические травмы древесины ствола и разрастающаяся вокруг них каллюсная ткань (Николаева, Савчук, 2020). Видимым результатом ЭГП на модельных участках были (1) раны ствола, (2) декапитация ствола и побеги замещения, (3) обломы ветвей. По нашим наблюдениям, если последнее наблюдаемое кольцо на травмированном секторе ствола соответствует или предшествует резкому изменению прироста, то это кольцо сформировалось в год травмы дерева и, соответственно, события. В противном случае произошел обдир не только коры, но и нескольких верхних слоев древесины, либо воздействие было незначительным.

Декапитация вершины молодого дерева часто приводит к активизации роста ветвей ниже слома и/или к формированию побегов замещения. Их прирост резко усиливается одновременно с резким снижением его у ствола, особенно около сломанной вершины. Сломанные ветви (сучки) в нижней части ствола оказались пригодны для датирования, если имели достаточно большой диаметр и собственный возраст, относительно широкие годовичные кольца и высокую амплитуду колебаний прироста по наибольшему радиусу их спила (Николаева и др., 2017б).

Временная “глубина” надежного датирования разных видов событий с помощью этой дендроиндикации не превышала 50 лет, далее в прошлое следы от травм на кервах встречались единично (Николаева и др., 2017а, б, 2018). В частности, за 1984–2018 гг. зафиксированы 4 события в селевом бассейне (табл. 2) и 15 в лавинном комплексе (табл. 3).

При *дендрометрической индикации* маркером событий являются резкие и значительные снижения/повышения абсолютных или относительных значений радиального прироста, которые могут длиться от одного года до двух десятков лет. Частный случай — выпавшие годовичные кольца (на керне).

В рамках этого метода итоговая анализируемая величина (индекс) является частным от деления относительных значений прироста нарушенных и контрольных деревьев. При вычислении этих значений используется два подхода, различающиеся по алгоритму обработки материала. При первом подходе проводится стандартизация рядов, принятая в дендроклиматологии, когда абсолютные величины прироста делятся на их среднюю динамическую норму (Methods..., 1990). При этом последовательно получается пара рядов индексов, где у стандартных убирается возрастная тренд при сохранении индивидуальных особенностей роста дерева, у остаточных — усиливается климатический сигнал. При втором подходе берется частное приростов соседних лет (Николаева и др., 2017а).

Первый подход наиболее полно описан и реализован при датировании событий в (Kogelnig-Mayer et al., 2011), где итоговая величина будет зависеть от нескольких составляющих, в том числе прироста, а воздействие выявляется при сравнении отклика отдельных деревьев с контролем. В рамках дендрометрического метода анализируется только прирост или его индексы. Авторами введены три градации интенсивности отклика дерева. Границы между соседними градациями проведены одновременно по двум количественным критериям: (1) пороговое значение индексов прироста (≤ 60 , ≥ 60 и $\geq 60\%$ соответственно) и (2) продолжительность его изменения (1–2, 2–4, ≥ 5 лет). К сожалению

Таблица 2. Датирование событий в селевом бассейне (первый модельный участок)

Год	Метод оценки						Событие	
	1	2	3	4	5	6	вид	размер
2018, конец мая	+	—	—	~	—	—	Мокрая лавина	1
2017, конец мая	+	+a	+a	~a	—	—	Мокрая лавина	1
2016, конец мая	+	—	—	~	—	—	Лавина	0
2013, начало июня	+	—	—	~	—	—	Лавина	0
2012, 14–16 июля	+	—	—	—	—	—	Сель	0*
2005	—	+б	—	—	—	—	Сель*	1
1998	+	—	+б	—	—	—	Сель	1
1994	—	+б	—	—	—	—	Сель-лавина?	1
2020–1985	—	—	—	—	—	√г	“Селевое затишье”	—
1980-е (1986**)	—	—	—	~a	—	—	Лавина	1
1984, 24 июня	+	+б	+б	~	—	√в	Сель	3
1939	—	+б	+б	—	—	√в	Сель	3
1938–1885	—	—	—	—	—	√г	“Селевое затишье”	—
1884	—	+б	+б	—	—	√в	Сель	3
1883~1600	—	—	—	—	—	√г	“Селевое затишье”	—
~1780~1830	—	—	~б	~б	—	√д	Пожар	3
??	—	—	—	—	—	√е	Не идентифицирован	3
~1550~1600	—	—	—	—	~б	√в	Сель	3
??	—	—	—	—	—	√в	Сель	3
??	—	—	—	—	—	√гд	“Селевое затишье” и пожар	— 1
Всего событий — 17	7	6	6	3	1	11		

Примечание. Методы: 1 — непосредственные наблюдения, 2 — травматическая, 3 — дендрометрическая и 4 — возрастная дендроиндикация, 5 — радиоуглеродное датирование, 6 — седиментационно-стратиграфическая индикация. Дополнительно применялся анализ: * изображений территории и ** метеоданных. Наличие события: “√” — зафиксированное, “—” — не зафиксированное. Точность датирования события: “+” с точностью до года, “~” приблизительная (серой заливкой отмечены годы с близкими по времени событиями), “??” дата не установлена. Группы деревьев с откликом: а — молодые (подрост), б — взрослые (древостой). Слои отложений: в — селевые, г — почвенно-растительные, д — с углями, е — не идентифицированные. Размер события (по пространственному расположению нарушенных деревьев и типу их нарушения): 0 — очень мелкое, 1 — мелкое, 2 — среднее, 3 — крупное.

нию, в современных публикациях дендроиндикационной направленности, в отличие от дендроклиматической, нам не удалось обнаружить ни упоминания о применении индексов прироста (стандартные или остаточные) деревьев, ни об алгоритме их сравнения.

Наиболее оптимальной в изученном селевом бассейне оказалась величина порогового значения в 65% (в отличие от 60% [по (Kogelnig-Mayer et al., 2011)]), поскольку 60% отсекает значительную часть откликов, датирующих события другими методами, а при более высоких значениях (70%) увеличивается доля “шума”. Отклик деревьев фиксируется обоими индексами. Пример реализации этого подхода приведен для модельного дерева (рис. 2). Величины стандартных и остаточных индексов его прироста ниже порогового значения соответствуют среднему и сильному откли-

ку по (Kogelnig-Mayer et al., 2011). Продолжительность снижения прироста у большинства деревьев составляла 1–6 и более лет (для стандартных индексов) и обычно 1 год (для остаточных), что соответствует среднему и сильному отклику в первом случае и слабому — во втором [по (Kogelnig-Mayer et al., 2011)].

Из этого следует, что границы граций обоих критериев (величина снижения прироста и его продолжительность) и согласование последних друг с другом, а также использование стандартных или остаточных индексов необходимо устанавливать для конкретной территории опытным путем.

При втором подходе к датированию событий радиальный прирост совокупности деревьев нормируется по формуле:

Таблица 3. Датирование событий на лавинном комплексе (второй модельный участок)

Зимне-весенний период, год	Метод оценки					Лавина	
	1	2	3	4***	5	вид	размер
2017/18, конец мая	+	—	—	—	—	Мокрая	0
2016/17, конец мая	+	—	—	—	—	Мокрая	0
2013/14	—	+	+	—	—	—	2
2012/13	—	+	+	+	—	—	1
2010/11	—	+	+	+	—	—	1
2009/10, 31 декабря	+	+	—	+	—	Сухая	3
2008/09	—	+	—	—	—	—	2
2007/08	—	+	+	—	—	—	3
2003/04	—	+	—	+	—	—	2
1998/99	—	—	—	+	—	Сухая	2
1997/98	—	+	—	—	—	—	3?
1996/97	—	+	—	+	—	—	2
1987/88	—	—	+	+	—	Сухая	2–3
1986/87	—	+	—	—	—	Сухая	2–3
1983/84	—	+	—	+	—	Сухая	3
1968/69	—	—	+	+	~	Сухая	1
1966/67	—	—	+	+	~	Сухая	1
1965/66, весна	+	—	+	—	~	—	3
1963/64	—	—	+	+	~	Сухая	3
1952/53	—	—	+	+	~	Сухая	3?
Всего событий — 20	4	11	10	12	1		

Примечание. Методы: 1 — непосредственные наблюдения, 2 — травматическая, 3 — анатомическая, 4 — дендрометрическая (***) при отклике на событие более 15% деревьев), 5 — возрастная дендроиндикации. Остальные обозначения см. табл. 2.

$$I = \frac{A_n / A_{n-1}}{B_n / B_{n-1}} \times 100,$$

где I — индекс, A , B — радиальный прирост n и $n-1$ года формирования у нарушенных (A) и контрольных (B) деревьев (Николаева и др., 2017а). Для анализа использовались радиусы с секторов ствола в направлении воздействующего фактора (вверх и вбок по склону, имеющие снижения прироста). Сектора с противоположной по величине реакцией исключались (участки с каллюсной тканью и, соответственно, всплеском прироста).

Нормированный прирост у деревьев разного возраста и степени нарушенности изменяется синхронно. Наибольшая амплитуда колебаний индексов прослеживается у деревьев в возрасте 150–200 лет (рис 3, 1–2, 4), наименьшая — 250–350 (см. рис 3, 3). Пороговая величина (70%) подобрана так, чтобы она была выше, чем в год с известным крупным событием (сель 1984 г.) на конусе выноса, но ниже, чем в годы их достоверного отсутствия (после 1984 г.). Из дат с приростом ниже пороговых значений только 4 (1884, 1939, 1984

и 1998 гг.) подтверждаются еще и другими методами (см. табл. 2). Прирост деревьев из нижней части зоны транзита (см. рис 3, 4) по сравнению с конусом чаще пересекает пороговые значения, что, по-видимому, связано с их откликом на ЭГП, которые фиксируются в основном в этой зоне.

Анализ нашего материала показал, что второй подход применим при (1) редкой повторяемости крупных событий, (2) достаточно сильном воздействии ЭГП, (3) отклике большинства деревьев на событие. Этим условиям соответствовал материал из селевого бассейна, но не лавинного комплекса. Результаты этих двух подходов в целом совпадают, но при втором трудозатраты существенно меньше. При обоих подходах ряды прироста не должны содержать подряд пропущенные несколько годовичных колец из-за давней травмы, гнили и т.п. В противном случае может произойти датирование ложных событий.

Временная “глубина” надежного датирования событий в селевом бассейне с помощью этой дендроиндикации составила около 170 лет, выявлен сход 3 крупных селей и по одному мелко-му селю и лавине (см. табл. 2), в лавинном ком-

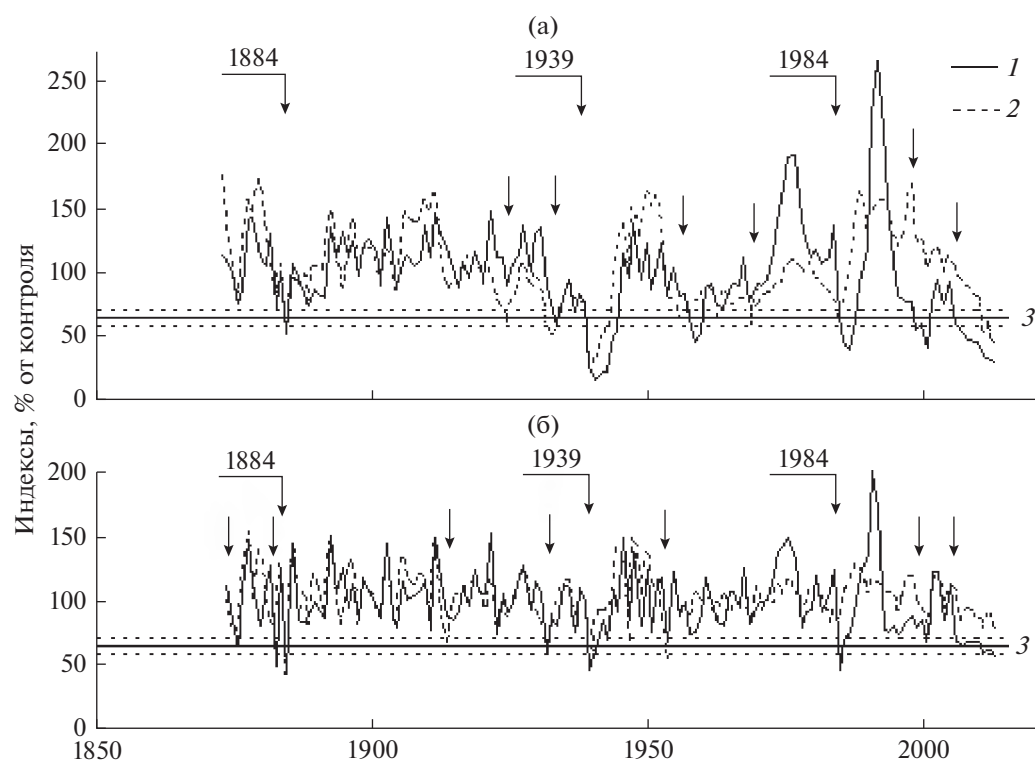


Рис. 2. Пример динамики стандартных (а) и остаточных (б) индексов прироста дерева кедра К-3 в селевом бассейне. 1, 2 – радиусы ствола вверх и вниз по склону соответственно, 3 – пороговые величины отклика: 65% – сплошная линия, 70 и 60% – пунктирная. Годы снижения прироста за пределы пороговой величины обозначены стрелками.

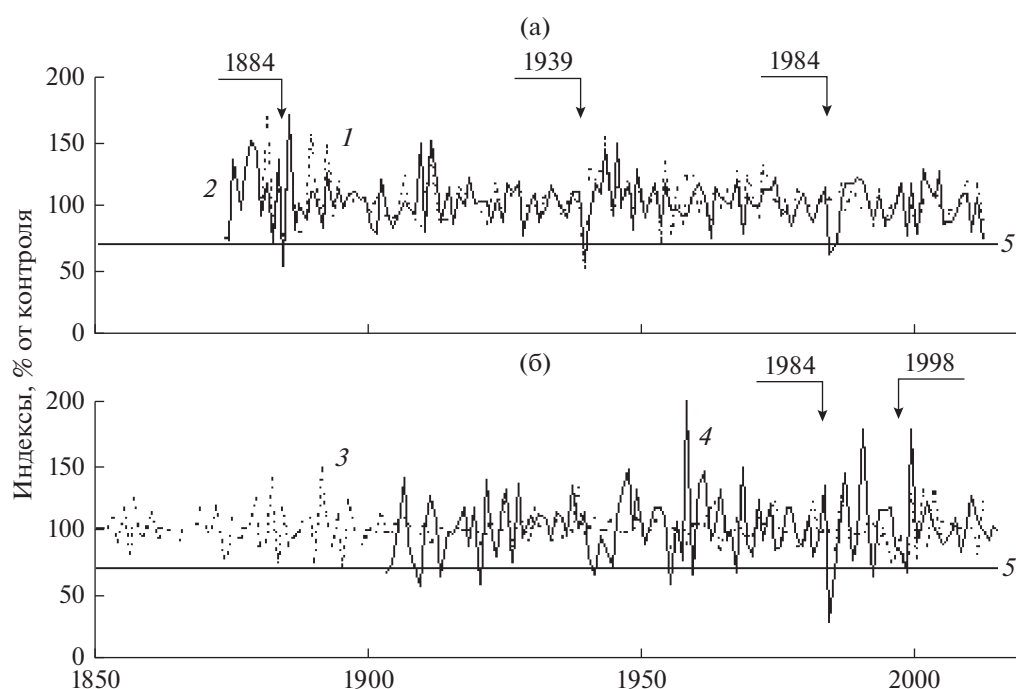


Рис. 3. Динамика индексов прироста деревьев кедра (1–3) и лиственницы (4) в селевом бассейне. Участки: зона аккумуляции с 1 – глинистой, 2–3 – крупнообломочной фракциями и 4 – нижняя часть зоны транзита. Возраст деревьев: 1, 2, 4 – 150–200, 3 – более 250 лет. 5 – пороговая величина отклика (70%), стрелки – годы снижения прироста, маркирующие события.

плексе — 65 лет и 12 лавин соответственно (см. табл. 3).

При деформационной дендроиндикации маркером событий является начало эксцентричного роста ствола дерева в районе его наклона/изгиба, когда у хвойных резко усиливается прирост ствола вниз по склону при его сохранении или снижении вверх по склону. Считается, что такая эксцентричность является косвенным индикатором оползней, сползания снега и т.п. (Горчаковский, Шиятов, 1985; Malik, Wistuba, 2012), хотя этот метод и использовался для датирования лавин на Алтае (Ревякин, Кравцова, 1977). Наши исследования показывают, что эксцентричные кольца у хвойных деревьев обычно появляются в молодом возрасте, пока ствол гибкий. Для датирования селей и лавин в верховьях р. Актру этот метод оказался малопригоден из-за относительно небольшого числа деревьев с визуально видимыми изгибами ствола и/или техническими сложностями при отборе кернов в районе этого изгиба у деревьев большого диаметра. Это косвенно подтверждается (Ревякин, Кравцова, 1977) малым количеством деревьев при дендроиндикации лавин на Алтае.

При анатомической дендроиндикации маркерами событий являются изменения в анатомической структуре древесины (появление: 1 — травматических, или патологических, смоляных ходов, 2 — реакционной древесины, или древесины сжатия у хвойных), которые сопровождают нарушения дерева (Горчаковский, Шиятов, 1985; Stoffel, Bollschweiler, 2008). Установлено, что травматические смоляные ходы формируются в древесине *Larix decidua* Mill., *Picea abies* (L.) H. Karst., *Abies alba* Mill. и не образуются у видов р. *Pinus* (Stoffel, Bollschweiler, 2008; Stoffel, Corona, 2014). В верховьях р. Актру визуальный анализ этих структур показал их редкую встречаемость у лиственницы сибирской (р. *Larix*), а у кедра сибирского (р. *Pinus*) они нами не обнаружены. Анализ дат их образования у лиственницы на Алтае (Мыглан и др., 2015) выявил случайный характер их распределения.

Исследование таких структур требует специальных приемов обработки материала и оборудования (Ballesteros et al., 2010), хотя часть смоляных ходов хорошо видна невооруженным глазом. Интерес может представлять еще один показатель — видимые визуально засмоленные годовичные кольца. Так, любое повреждение ствола сосны (*Pinus sylvestris* L.) приводит к изменению количества, строения и расположения смоляных ходов в годовичном кольце, а смола начинает заполнять различные структуры древесины (Курьянова и др., 2011), т.е. происходит засмоление последней.

В верховьях р. Актру на всех кернах, взятых через небольшие открытые раны (площадью 10–

300 см²) ствола кедра и лиственницы или рядом с ними, зафиксированы от 1 до 10 засмоленных колец подряд, приходящихся на год травмы и/или до и после нее. Такие раны быстро исчезают, с краев зарастая каллюсной тканью. Деревья с открытыми ранами более 300 см² чаще имеют сухую древесину без смолы и длительное время не зарастают, редко имеют 1–2 засмоленных кольца (Николаева и др., 2018). Анализ закрытых (не видимых в настоящее время) механических травм прошлого, обнаруженных на кернах, показал наличие вокруг них уже до четырех десятков таких колец. Следовательно, наличие засмоленных колец на кернах диагностирует раны небольшого размера, со временем заросшие. Такие кольца даже при отсутствии травмы на керне будут указывать на интервал времени (до нескольких десятков лет), когда событие произошло, поэтому их лучше применять для предварительного определения времени воздействия.

Второй маркер — реакционная древесина — обнаружен только у трех относительно молодых деревьев на обвально-осыпном участке склона и не найден на селевом и лавинном (Николаева и др., 2018), поэтому он пока не может быть включен в дендроиндикационный анализ.

При возрастной дендроиндикации маркером событий после катастрофических воздействий служит возраст основных генераций древесных видов. Неопределенность датирования этим методом связана с (1) трудностью определения точного возраста дерева по годовичным кольцам и (2) видоспецифичностью и локальностью заселения деревьями территории после такого события в прошлом (Горчаковский, Шиятов, 1985; Stoffel, Bollschweiler, 2008; Stoffel, Corona, 2014).

Обычно возраст дерева подсчитывается суммированием количества колец на (1) образце древесины, (2) его отрезке около отсутствующей сердцевины, (3) высоте ствола отбора образца. Определение первых двух слагаемых возраста обычно не вызывает трудностей (Николаева, Савчук, 2020). Третье слагаемое оценить гораздо сложнее из-за видовой специфики роста деревьев в молодом возрасте и изменений микроусловий произрастания в пространстве и во времени. При этом необходимо учитывать возраст не только надземной (высота отбора образца), но и подземной (засыпанная и/или полегшая) частей ствола.

Прибавка к возрасту на высоту отбора образца определялась по обследованным нами в 2015–2017 гг. молодым, хорошо растущим особям. Первые 10 см высоты кедр достигает в 7–16 лет (в среднем за 12.5 лет), на следующие 20 и 30 см требуется еще по 2–5 лет (по 3.5), 1 м высоты они достигают в 24–35 лет (за 25.6).

Прибавка к возрасту на засыпанную вертикальную часть ствола у деревьев зависит от высо-

ты засыпания. Так, по нашим данным, эта высота составляла от 0.6 до 2 м, а по данным М.Ф. Адаменко — до 3–5 м. У одного из обследованных деревьев кедра поправка на возраст засыпанной на 1.2 м ствола — 88 лет (Николаева, Савчук, 2015), то есть около 1.4 года на 1 см высоты. Такие деревья обычно имеют более низкие значения линейного и радиального прироста по сравнению с незасыпанными. Прибавка возраста на засыпанную высоту ствола в 0.6–2 м, по нашим расчетам, составляет 82–280 лет.

Полегшая часть ствола обычно образуется у молодых деревьев под действием снега, воды, обломочного материала и т.п. Определение собственного возраста этой части ствола в литературе не найдено, необходимы дополнительные исследования.

Время заселения деревьями различных зон селевого бассейна и лавинного комплекса составило от одного до пяти десятилетий (см. табл. 1) и, видимо, зависело от внешних условий. Например, в селевом бассейне в мае 2017 г. сошла мокрая лавина, которая привела к частичному освобождению террас нижней части зоны транзита от крупного подроста. Появлению и выживанию хвойных здесь в настоящее время препятствуют (1) регулярный сход лавин в течение ряда лет (только в последнем десятилетии это — 2013, 2016–2018 гг.) и (2) наличие густого травяно-кустарникового покрова. Обследование этой территории подтвердило отсутствие на ней всходов хвойных в 2017 и 2018 гг. Это способствует растянутому по времени заселению ее деревьями и приведет к неопределенности датирования события в будущем — период минимум в два десятилетия: 2010–2020-е годы.

В целом временная “глубина” датирования событий этим методом составила около 200 лет в селевом бассейне и 125 лет в лавинном комплексе, выявлено 3 и 2 события соответственно (см. табл. 1–3).

Первичным результатом лабораторного этапа исследований является **датирование событий прошлого**. В верховьях р. Актру оно проводилось с помощью каждого дендроиндикационного метода отдельно. Если установленные даты и типы событий подтверждались как минимум двумя методами, то они считались надежными.

В селевом бассейне всего выявлено 17 событий (см. табл. 2). Дендроиндикационными методами за последние 220 лет датировано 8 событий: 3 крупных селя (1884, 1939 и 1984 гг.), 5 более мелких селей и лавин (1986, 1994, 1998, 2005, 2017 гг.), 1 пожар (конец XVIII — начало XIX в.). Кроме того, имеется отклик деревьев на события в зоне транзита в XX в. и в зоне аккумуляции в 1950-е годы, вызванные, скорее всего, мелкими ЭГП и повышенной антропогенной активностью при постройке географической станции соответствен-

но. Только недендроиндикационными методами были установлены даты лавин в 2013, 2016, 2018 гг. (непосредственные наблюдения) и наличие 4 событий ранее 1800 г. (седиментационно-стратиграфическая индикация), а также уточнены наличие и размеры селя в 2012 г., тип события в 2005 г. (спутниковые изображения), тип и год события в 1986 г. (метеоданные).

На конусе выноса лавинного комплекса всего за последние 65 лет выявлено 20 лавин, дендроиндикационными — 18. Большинство лет с лавинами подтверждаются 2–3 методами: 1953, 1964, 1967, 1969, 1984, 1987, 1988, 1997, 1998, 2004, 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014 гг. (см. табл. 3).

Дендроиндикационные методы, как и любые другие, имеют свои ограничения, главными из которых являются (1) наличие деревьев-индикаторов в зоне датируемых ЭГП и (2) длина древесно-кольцевого ряда (Kogelnig-Mayer et al., 2011; Stoffel, Corona, 2014). Поэтому полученные хронологии селей и особенно лавин в верховьях р. Актру, так же, как и на других горных территориях [см., например, (Kogelnig-Mayer et al., 2011; Trappmann et al., 2013)], являются неполными из-за того, что даже крупные события могут не всегда фиксироваться этими методами. Например, лавина 1966 г., описанная М.А. Душкиным (1974), уничтожила деревья в лавинном комплексе на просеке длиной 200 м. Она зафиксирована нами с помощью не очень надежного маркера — одного засмоленного кольца единственного дерева, у остальных растущих деревьев реакция не обнаружена, а погибшие не сохранились. Сель 2012 г. в селевом бассейне остановился в верхней части зоны транзита, не дойдя до деревьев, хотя эти сели были массовыми и крупными не только для верховьев р. Актру (очевидцы, спутниковые изображения), но и Алтая в целом (Абдильянов, Достовалова, 2012).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье оценены применяемые в дендроиндикационных исследованиях и изложенные в (Николаева, Савчук, 2020) методы датирования прошлых событий, вызванных ЭГП, в конкретных горных условиях — верховьях р. Актру (Северо-Чуйский хребет, Горный Алтай). Как показали наши исследования, здесь возрастная и анатомическая (засмоленные кольца) индикации являются предварительными (приблизительное датирование событий: период), травматическая и дендрометрическая — основными (точное датирование: год), недендроиндикационные методы — дополнительными (уточнение размера, вида и года события). Для оценки применения анатомической (травматические смоляные ходы, реакционная древесина) и деформационной индикаций необходимы дополнительные исследования. Полученные хроноло-

гии селей и лавин как результат датирования событий всегда будут неполными из-за наличия у любого метода объективных ограничений. А комплексное использование всех этих методов в тематическом дендроиндикационном исследовании будет способствовать более полному выявлению событий, повышению точности и достоверности их датирования в прошлом. Получаемые с помощью этих методов хронологии будут полезны для оценки активности ЭГП в прошлом на малоизученных в этом плане территориях и их прогноза.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственной темы № АААА-А17-117013050039-4.

FUNDING

The study is supported by the state budget theme no. АААА-А17-117013050039-4.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят многочисленных очевидцев селей и лавин в верховьях р. Актру.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank numerous eyewitnesses of the debris flow and snow avalanche events in the Aktru headwater.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдульмянов С.Н., Достовалова М.С. Особенности летнего периода 2012 года “Сезон ливней — сезон селей”. 2012. 4 с. http://www.geophotobank.com/al-tai/article/article-pdf/2012-sommer_mudflow-season.pdf
- Барашкова Н.К., Королева Т.В., Шмыглева Г.М. Условия схода селя в долине р. Актру в Горном Алтае 24 июня 1984 г. // Материалы гляциологических исследований. М.: Ин-т геогр. РАН, 1986. Вып. 56. С. 121–124.
- Галахов В.П., Назаров А.Н., Харламова Н.Ф. Колебания ледников и изменения климата в позднем голоцене по материалам исследований ледников и ледниковых отложений бассейна Актру (Центральный Алтай, Северо-Чуйский хребет). Барнаул: Изд-во АГУ, 2005. 132 с.
- География лавин / ред. С.М. Мягков, Л.А. Канаев. М.: Изд-во МГУ, 1992. 249 с.
- Горчаковский П.Л., Шиятов С.Г. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях. М.: Наука, 1985. 209 с.
- Душкин М.А. Лавины в верховьях долины Актру // Гляциология Алтая. Томск: Изд-во ТГУ, 1974. Вып. 8. С. 39–59.
- Ивановский Л.Н. Экзогенная литодинамика горных стран. Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.
- Курьянова Т.К., Платонов А.Д., Косиченко Н.Е., Снигирева С.Н., Чеботарев В.В., Макаров А.В. Влияние вида пожара на структуру и качество древесины сосны // Науч. журн. КубГАУ. 2011. № 74 (10). С. 1–14. <http://ej.kubagro.ru/2011/10/pdf/69.pdf>
- Мыглан В.С., Баринов В.В., Назаров А.Н. Построение тысячелетних древесно-кольцевых хронологий Koksui и Tara для территории Алтая // Журн. Сиб. федерал. ун-та. Биология. 2015. Т. 8. № 3. С. 319–332.
- Назаров А.Н., Мыглан В.С., Орлова Л.А., Овчинников И.Ю. Активность ледника Малый Актру (Центральный Алтай) и изменения границы леса в бассейне Актру за исторический период // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 1. С. 103–118.
- Николаева С.А., Белова (Диркс) М.Н. Фитоценотическая оценка местообитаний в местах схода селей и лавин в верховьях р. Актру (Горный Алтай) // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2017. № 40. С. 181–201.
- Николаева С.А., Савчук Д.А. Методы дендроиндикации экзогенных гравитационных процессов: обзор // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 3. С. 441–450.
- Николаева С.А., Савчук Д.А. Морфологические формы кедров сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в высокогорных лесах Северо-Чуйского хребта. Дендрохронологический аспект // Журн. Сиб. федерал. ун-та. Биология. 2015. Т. 8. № 4. С. 456–477.
- Николаева С.А., Савчук Д.А., Бочаров А.Ю. Влияние различных факторов роста деревьев *Pinus sibirica* в высокогорных лесах Центрального Алтая // Журн. Сиб. федерал. ун-та. Биология. 2015. Т. 8. № 3. С. 299–318.
- Николаева С.А., Савчук Д.А., Кузнецов А.С. Датирование селевой активности в горно-ледником бассейна Актру (Горный Алтай) // Геориск. 2017а. № 2. С. 56–63.
- Николаева С.А., Савчук Д.А., Кузнецов А.С. Особенности датирования селей, лавин и камнепадов в верховьях р. Актру (Северо-Чуйский хребет, Центральный Алтай) по травмам деревьев // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2017б. № 4. С. 35–47.
- Николаева С.А., Савчук Д.А., Кузнецов А.С. Особенности камнепадной и лавинной активности в верховьях р. Актру (Горный Алтай) по данным дендроиндикации // Успехи современного естествознания. 2018. № 12. С. 92–97.
- Перов В.Ф. Селеведение. М.: Геогр. фак-тет МГУ, 2012. 272 с.
- Ревякин В.С., Кравцова В.И. Снежный покров и лавины Алтая. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1977. 216 с.
- Титова З.А., Петкевич М.В. Наблюдения над конусами аккумуляции в долине реки Актру // Гляциология Алтая. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1964. Вып. 3. С. 115–141.
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепина В.С., Наурузбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевых

- вой информации. Красноярск: Изд-во КрасГУ, 2000. 80 с.
- Ballesteros J.F., Stoffel M., Bodoque J.M., Bollschweiler M., Hitz O., Díez-Herrero A. Changes in wood anatomy in tree rings of *Pinus pinaster* Ait. Following wounding by flash floods // *Tree-Ring Res.* 2010. V. 66. № 2. P. 93–103.
- Chiroiu P. Geomorphological studies of slope processes by the analysis of tree-rings // *Cent. Eur. Reg. Pol. Hum. Geogr.* 2013. V. 3 (1). P. 93–105.
- Kogelnig-Mayer B., Stoffel M., Schneuwly-Bollschweiler M., Hübl J., Rudolf-Miklau F. Possibilities and limitation of dendrogeomorphic time-series reconstruction on sites influenced by debris flows and frequent snow avalanche activity // *Arctic, Antarctic and Alpine Res.* 2011. V. 43. № 4. P. 649–658.
- Malik I., Wistuba M. Dendrochronological methods for reconstructing mass movements – an example of landslide activity analysis using tree-ring eccentricity // *Geochronometria.* 2012. V. 39 (3). P. 180–196.
- Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences / Cook E.R., Kairukstis L.A. (Eds.). Dordrecht-Boston-London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p.
- Stoffel M., Bollschweiler M. Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview // *Natural Hazards and Earth System Sci.* 2008. V. 8. P. 187–202.
- Stoffel M., Corona C. Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees // *Tree-Ring Res.* 2014. V. 70. № 1. P. 3–20.
- Timoshok E.E., Timoshok E.N., Nikolaeva S.A., Savchuk D.A., Filimonova E.O., Skorokhodov S.N., Bocharov A.Yu. Monitoring of high altitudinal terrestrial ecosystems in the Altai Mountains // *IOP conf. series: Earth and Environmental Science.* 2016. V. 48. P. 1–9.
- Trappmann D., Corona C., Stoffel M. Rolling stones and tree rings: A state of research on dendrogeomorphic reconstructions of rockfall // *Progress in Phys. Geogr.* 2013. V. 37. № 5. P. 701–716.

Assessment of Dendrogeomorphological Dating Methods of Past Geomorphic Processes in the Aktru Headwater (the Russian Altai Mountains)

S. A. Nikolaeva^{1, *} and D. A. Savchuk^{1, **}

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the SB RAS, Tomsk, Russia*

*e-mail: sanikol1@rambler.ru

**e-mail: savchuk@imces.ru

At the present, the dendrogeomorphological methods are widespread to date the past geomorphic processes. In areas that are poorly studied in this regard, they need to be tested for the effectiveness of their use. The article's goal is to evaluate the dendrogeomorphological methods of the past geomorphic events dating in the Aktru headwater (the Severo-Chuisky Range, the Russian Altai Mountains). The peculiarities of the methods were considered, and their effectiveness was evaluated for dating the past debris flows and snow avalanches in the debris flow torrent and snow avalanche path. The injury and the radial increment dendroindications were main and anatomical (tree-rings saturated by resin) and age dendroindications were additional. The non-dendrogeomorphological methods of detection and dating of the past geomorphic events (eyewitnesses, soil profiles, radiocarbon analyses, etc.) appeared to be especially useful. The use of all these methods in a complex made it possible to increase both the past events detection and the accuracy and reliability of their dating. In the debris flow torrent, 13 events (6 debris flows, 5 snow avalanches, 1 wildfire, and 1 unidentified event) were dated during 220 years before the present. In the snow avalanche path, 20 avalanches were dated during 65 years before the present.

Keywords: dendroindication, debris flow, snow avalanche, tree-ring, injury, radial increment

REFERENCES

- Abdul'myanov S.N., Dostovalova M.S. Peculiarities of summer period of 2012 "Rainfall season is debris flow season". 2012. 4 p. Available at http://www.geophotobank.com/altai/article/article-pdf/2012-sommer_mudflow-season.pdf (accessed: 10.03.2021). (In Russ.).
- Ballesteros J.F., Stoffel M., Bodoque J.M., Bollschweiler M., Hitz O., Díez-Herrero A. Changes in wood anatomy in tree rings of *Pinus pinaster* Ait. following wounding by flash floods. *Tree-Ring Res.*, 2010, vol. 66, no. 2, pp. 93–103.
- Barashkova N.K., Koroleva T.V., Shmygleva G.M. Debris flow in the Aktru river valley of the Altai Mountains in 24 June 1984. In *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy* [Materials of Glaciological Studies]. Moscow: Inst. Geogr. RAS, 1986, vol. 56, pp. 121–124. (In Russ.).
- Chiroiu P. Geomorphological studies of slope processes by the analysis of tree-rings. *Cent. Eur. Reg. Pol. Hum. Geogr.*, 2013, vol. 3, no. 1, pp. 93–105.
- Dushkin M.A. Avalanches in the Aktru headwater. In *Glyatsiologiya Altaya* [Glaciology of the Altai Mountains]. Tomsk: Tomsk. Gos. Univ., 1974, vol. 8, pp. 39–59. (In Russ.).
- Galakhov V.P., Nazarov A.N., Kharlamova N.F. *Kolebaniya lednikov i izmeneniya klimata v pozdnem golotsene po materialam issledovaniy lednikov i lednikovyykh ot-*

- lozhenii basseina Aktru (Tsentral'nyi Altai, Severo-Chuiskii khrebet)* [Glacier Fluctuations and Climate Changes in the Late Holocene According to Materials of Studies of Glaciers and Glacier Sedimentation in the Aktru Basin (the Central Altai Mountains, the North-Chuya Range)]. Barnaul: Altai. Gos. Univ., 2005. 132 p.
- Geografiya lavin [Geography of Avalanches]. Myagkov S.M., Kanaev L.A., Eds. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1992. 249 p.
- Gorchakovskii P.L., Shiyatov S.G. *Fitoindikatsiya usloviy sredy i prirodnikh protsessov v vysokogor'yakh* [Phytoindication of Environmental Conditions and Nature Processes in High Altitude Mountains]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 209 p.
- Ivanovskii L.N. *Ekzogennaya litodinamika gornyykh stran* [Exogenous Lithodynamics in Mountains]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1983. 160 p.
- Kogelnig-Mayer B., Stoffel M., Schneuwly-Bollsweiler M., Hübl J., Rudolf-Miklau F. Possibilities and limitation of dendrogeomorphic time-series reconstruction on sites influenced by debris flows and frequent snow avalanche activity. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 2011, vol. 43, no. 4, pp. 649–658.
- Kuryanova T.K., Platonov A.D., Kosichenko N.E., Snegireva S.N., Chebotarev V.V., Makarov F.V. Effect of fire on the structure and quality of pine wood. *Nauchn. Zh. KubGAU*, 2011, vol. 74, no. 10, pp. 1–14. (In Russ.).
- Malik I., Wistuba M. Dendrochronological methods for reconstructing mass movements – an example of landslide activity analysis using tree-ring eccentricity. *Geochronometria*, 2012, vol. 39, no. 3, pp. 180–196.
- Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Cook E.R., Kairukstis L.A., Eds. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p.
- Myglan V.S., Barinov V.V., Nazarov A.N. A millennium-long tree-ring chronologies Koksui and Tara on Altay. *Zh. Sibir. Fed. Univ., Biol.*, 2015, vol. 8, no. 3, pp. 319–332. (In Russ.).
- Nazarov A.N., Myglan V.S., Orlova L.A., Ovchinnikov I.Yu. Activity of the Maly Aktru Glacier (the Central Altai Mountains) and change of upper forest line in the Aktru basin during the historical period. *Led i Sneg*, 2016, vol. 56, no. 1, pp. 103–118. (In Russ.).
- Nikolaeva S.A., Belova (Dirks) M.N. Phytocoenotic valuation of sites on avalanche tracks and debris flow deposits in the Aktru headwater. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ., Biol.*, 2017, vol. 40, pp. 181–201. (In Russ.).
- Nikolaeva S.A., Savchuk D.A. Assessment of dendrogeomorphological dating methods of past geomorphic processes in the Aktru headwater (the Russian Altai Mountains). *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 3, pp. 441–450. (In Russ.).
- Nikolaeva S.A., Savchuk D.A. Morphological forms of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) trees in high altitudinal forests of the North-Chuya Range. Dendrochronological aspect. *Zh. Sibir. Fed. Univ., Biol.*, 2015, vol. 8, no. 4, pp. 456–477. (In Russ.).
- Nikolaeva S.A., Savchuk D.A., Bocharov A.Yu. Influence of different factors on tree growth of *Pinus sibirica* in the highlands of the Central Altai Mountains. *Zh. Sibir. Fed. Univ., Biol.*, 2015, vol. 8, no. 3, pp. 299–318. (In Russ.).
- Nikolaeva S.A., Savchuk D.A., Kuznetsov A.S. Dating of debris flow activity in the Aktru mountain glacier basin (the Altai Mountains). *Georisk*, 2017a, no. 2, pp. 56–63. (In Russ.).
- Nikolaeva S.A., Savchuk D.A., Kuznetsov A.S. Dating of debris flows, avalanches and rockfalls in the Aktru headwater (North-Chuya Range, the Central Altai Mountains) by tree injuries. *Geokol. Inzhenern. Geol. Gidroteol. Geokriol.*, 2017b, no. 4, pp. 35–47. (In Russ.).
- Nikolaeva S.A., Savchuk D.A., Kuznetsov A.S. Peculiarities of rockfall and avalanche activity in the Aktru headwater (the Altai Mountains). *Usp. Sovr. Estestvozn.*, 2018, no. 12, pp. 92–97. (In Russ.).
- Perov V.F. *Selevedenie* [Debris Flow Science]. Moscow: Geogr. Fakul'tet. Mosk. Gos. Univ., 2012. 272 p.
- Revyakin V.S., Kravtsova V.I. *Snezhnyi pokrov i laviny Altaya* [Snow Cover and Avalanches of the Altai Mountains]. Tomsk: Tomsk. Gos. Univ., 1977. 216 p.
- Titova Z.A., Petkevich M.V. Observations of accumulation cones in the Aktru river valley. In *Glyatsiologiya Altaya* [Glaciology of Altai]. Tomsk: Tomsk. Gos. Univ., 1964, vol. 3, pp. 115–141. (In Russ.).
- Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdeyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Khandemirov R.M. *Metody dendrokronologii* [Methods of Dendrochronology]. Vol. 1: *Osnovy dendrokronologii. Sbor i poluchenie drevesno-kol'tsevoi informatsii* [Basics of Dendrochronology. Collection and Determination of Tree Ring Information]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. Gos. Univ., 2000. 80 p.
- Stoffel M., Bollschweiler M. Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2008, vol. 8, no. 2, pp. 187–202.
- Stoffel M., Corona C. Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Tree-Ring Res.*, 2014, vol. 70, no. 1, pp. 3–20.
- Timoshok E.E., Timoshok E.N., Nikolaeva S.A., Savchuk D.A., Filimonova E.O., Skorokhodov S.N., Bocharov A.Yu. Monitoring of high altitudinal terrestrial ecosystems in the Altai Mountains. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2016, vol. 48, 012008. doi 10.1088/1755-1315/48/1/012008
- Trappmann D., Corona C., Stoffel M. Rolling stones and tree rings: A state of research on dendrogeomorphic reconstructions of rockfall. *Prog. Phys. Geogr.*, 2013, vol. 37, no. 5, pp. 701–716.