

## **Содержание**

Авторы .....	x
Предисловие ко второму изданию .....	xi
Предисловие автора к русскому переводу второго издания (2011 г.) .....	xiii
Предисловие редактора перевода .....	xv
<b>ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЮ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Предмет палеосейсмологии .....	1
1.1.1. Определение и цели .....	1
1.1.2. Структура и содержание этой книги .....	7
1.1.3. Соотношение палеосейсмологии с другими видами неотектонических исследований .....	8
1.2. Выявление доисторических землетрясений по первичным и вторичным признакам .....	13
1.2.1. Классификация палеосейсмодислокаций .....	13
1.2.2. Неполнота палеосейсмологической летописи .....	20
1.2.3. Недостаточная либо избыточная представительность палеосейсмологической летописи .....	24
1.3. Датирование доисторических землетрясений и определение их повторяемости .....	26
1.3.1. Отношение надежности и точности определения возрастов к оценке повторяемости палеоземлетрясений .....	28
1.3.2. Модели повторяемости .....	30
1.4. Оценка магнитуд доисторических землетрясений .....	32
1.5. Начальный период развития палеосейсмологии, 1890–1980 годы .....	34
<b>ГЛАВА 2А. ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ НАЗЕМНЫХ ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>38</b>
2A.1. Введение .....	38
2A.1.1. Вопросы, рассматриваемые в этой главе .....	38
2A.1.2. Предпочтительная последовательность проведения исследований .....	39
2A.2. Картрирование палеосейсмогенных форм рельефа .....	41
2A.2.1. Определение местоположения поверхностных деформаций .....	41
2A.2.2. Различие между картированием отложений и картированием форм рельефа в сейсмических районах .....	57
2A.2.3. Детальное топографическое картрирование .....	58
2A.2.4. Составление топографических профилей .....	60
2A.2.5. Методы датирования позднечетвертичных форм рельефа .....	64
2A.3. Изучение палеосейсмодислокаций в разрезе .....	66
2A.3.1. Геофизические методы в палеосейсмологии .....	68
2A.3.2. Траншевые исследования .....	81
2A.3.3. Бурение, отбор керна, отбор пластинчатых образцов (slicing) и грунтовых монолитов (peeling) .....	129

---

2A.3.4. Методы датирования позднечетвертичных отложений . . . . .	135
2A.4. Различие палеосейсмодислокаций от несейсмогенных и нетектонических образований . . . . .	138
2A.4.1. Особый случай: стабильные внутриконтинентальные области . . . . .	142
2A.5. Специальные области палеосейсмологии . . . . .	149
2A.5.1. Археосейсмология . . . . .	149
2A.5.2. Дендросейсмология . . . . .	157
<b>ГЛАВА 2Б. ПОДВОДНАЯ ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЯ.....</b>	<b>159</b>
2Б.1. Введение . . . . .	159
2Б.1.1. Содержание главы . . . . .	159
2Б.2. Картрирование и датирование подводных палеосейсмических форм рельефа . . . . .	160
2Б.2.1. Методы подводного картрирования и фотографирования . . . . .	160
2Б.2.2. Датирование подводных структур, форм рельефа и осадков с использованием палеосейсмической стратиграфии . . . . .	169
2Б.3. Выявление первичных сейсмодислокаций: активное разрывообразование и структуры . . . . .	178
2Б.3.1. Непосредственное изучение разломов . . . . .	178
2Б.3.2. Внеразломные исследования . . . . .	189
2Б.4. Выявление вторичных признаков: оползней, турбидитов, подводных отложений цунами . . . . .	191
2Б.4.1. Распознавание землетрясений и несейсмогенных триггерных механизмов . . . . .	193
2Б.4.2. Турбидитная палеосейсмология . . . . .	202
2Б.4.3. Подводные отложения цунами . . . . .	215
2Б.4.4. Озерные обстановки . . . . .	218
2Б.4.5. Подводные сейсмогенные оползни . . . . .	224
2Б.4.6. Синхронные свидетельства движений в зонах разломов и выделения флюидов . . . . .	226
<b>ГЛАВА 3. ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ.....</b>	<b>228</b>
3.1. Введение . . . . .	228
3.1.1. Стили, масштабы и условия деформаций растяжения . . . . .	229
3.1.2. Деформационный сейсмический цикл в условиях растяжения . . . . .	235
3.1.3. Исторические землетрясения-аналоги . . . . .	237
3.2. Геоморфологические признаки палеоземлетрясений . . . . .	240
3.2.1. Тектоническая геоморфология блоков, разделенных сбросами . . . . .	241
3.2.2. Особенности поверхностей смещения в коренных породах и других скальных поверхностей . . . . .	247
3.2.3. Образование приразломных уступов в рыхлых осадках . . . . .	249
3.2.4. Вырождение разломных уступов в рыхлых отложениях . . . . .	264

---

3.2.5. Пространственно-временные изменения смещения поверхности .....	270
3.2.6. Формы рельефа, образованные одноактными и повторяющимися смещениями по разрыву .....	274
3.3. Стратиграфические (структурные) признаки палеоземлетрясений .....	285
3.3.1. Особенности строения приповерхностных сбросов в разрезе .....	286
3.3.2. Распознавание тектонических и осадочных образований.....	291
3.3.3. Осадконакопление и почвообразование в зоне разлома .....	296
3.3.4. Измерение смещения по обнажениям сбросов.....	316
3.3.5. Различение криповых смещений от эпизодических подвижек.....	319
3.4. Датирование палеоземлетрясений .....	320
3.4.1. Прямое датирование обнаженной поверхности разрыва .....	321
3.4.2. Прямое датирование путем моделирования разрушения уступа .....	323
3.4.3. Оценки возраста по развитию почвы на приразломных уступах .....	328
3.4.4. Определение возрастных рамок разрывообразования датированием геоморфологических поверхностей .....	330
3.4.5. Определение возрастных рамок разрывообразования датированием нарушенных осадков .....	332
3.4.6. Определение возрастных рамок разрывообразования датированием коллювиальных клиньев .....	333
3.4.7. Оценки возрастов по космогенным нуклидам в разрезах приразломных уступов .....	339
3.5. Интерпретация истории палеосейсмичности при помощи ретродеформаций .....	339
3.5.1. Типы ретродеформаций .....	341
3.5.2. Допущения, используемые при восстановлении доразрывной формы и положения слоев.....	342
3.5.3. Учет почвообразования при ретродеформировании .....	345
3.6. Распознавание тектонических и нетектонических сбросов .....	347
3.6.1. Тектонические, но несейсмогенерирующие сбросы .....	348
3.6.2. Нетектонические, но сейсмогенерирующие сбросы .....	348
3.6.3. Нетектонические и несейсмогенерирующие сбросы .....	349
<b>ГЛАВА 4. ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ .....</b>	<b>352</b>
4.1. Введение .....	352
4.2. Вулканические структуры растяжения.....	355
4.2.1. Мировые примеры вулканических структур растяжения .....	355
4.2.2. Вулканы центрального типа и кальдеры.....	361
4.2.3. Вулканические рифтовые зоны .....	363
4.2.4. Неустойчивость склонов, связанная с внедрением магмы .....	375
4.3. Критерии для распознавания вулканических структур растяжения в поле.....	376
4.3.1. Результаты эмпирического и численного моделирования.....	377
4.3.2. Вулкано-тектоническая геоморфология .....	379

---

4.3.3. Геофизические методы . . . . .	380
4.3.4. Дистанционные геодезические методы. . . . .	382
4.4. Палеосейсмологические приложения и методы . . . . .	384
4.4.1. Горные работы . . . . .	385
4.4.2. Геохронология . . . . .	387
4.4.3. Интервалы повторения . . . . .	388
4.4.4. Максимальная магнитуда . . . . .	389
4.5. Заключение . . . . .	406
4.6. Информация на CD-диске . . . . .	408
<b>ГЛАВА 5. ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕКТОНИЧЕСКОГО СЖАТИЯ . . . . .</b>	<b>410</b>
5.1. Введение . . . . .	410
5.1.1. Организация этой главы . . . . .	412
5.1.2. Стили, масштабы и обстановки деформаций . . . . .	412
5.1.3. Сейсмический деформационный цикл для взбросов . . . . .	420
5.1.4. Исторические землетрясения-аналоги . . . . .	421
5.2. Геоморфологические признаки взбросовых палеоземлетрясений . . . . .	425
5.2.1. Первичная морфология взбросовых и надвиговых уступов . . . . .	426
5.2.2. Разрушение надвиговых уступов . . . . .	428
5.2.3. Взаимодействие надвиговых уступов с геоморфологическими поверхностями. . . . .	430
5.2.4. Определение средних скоростей смещения . . . . .	434
5.2.5. Пространственные и временные вариации поверхностных смещений . . . . .	435
5.3. Стратиграфические признаки взбросовых и надвиговых палеоземлетрясений . . . . .	439
5.3.1. Общий стиль взбросовых деформаций в разрезе. . . . .	439
5.3.2. Траншевые методы исследований . . . . .	441
5.3.3. Строение и эволюция взбросовых уступов. . . . .	444
5.3.4. Строение и эволюция надвиговых уступов . . . . .	447
5.3.5. Стратиграфически ограниченное смещение. . . . .	453
5.3.6. Осадочные последовательности, трансгрессивно перекрывающие разрывы . . . . .	455
5.3.7. Обобщение стратиграфических признаков надвиговых палеоземлетрясений . . . . .	457
5.3.8. Распознавание криповых и эпизодических (резких) смещений . . . . .	458
5.4. Датирование палеоземлетрясений . . . . .	458
5.4.1. Прямое датирование обнаженной плоскости разлома. . . . .	459
5.4.2. Прямое датирование посредством моделирования разрушения уступа . . . . .	459
5.4.3. Оценки возраста по развитию почвы на приразломных уступах . . . . .	459
5.4.4. Определение возрастных рамок разрывообразования датированием смещенных отложений . . . . .	460
5.5. Интерпретация палеосейсмической истории с помощью ретродеформаций . . . . .	461

---

5.5.1. Ретродеформации в виде жестких блоков . . . . .	461
5.5.2. Пластичные ретродеформации . . . . .	463
5.6. Распознавание сейсмогенерирующих и несейсмогенерирующих взбросов . . . . .	466
5.6.1. Тектонические, но несейсмогенерирующие взбросы . . . . .	466
5.6.2. Нетектонические, но сейсмогенерирующие взбросы . . . . .	471
5.6.3. Нетектонические и несейсмогенерирующие взбросы . . . . .	471
5.7. Опасности, обусловленные поверхностным взбросообразованием . . . . .	473
5.8. Палеосейсмологические признаки косейсмического складкообразования . . . . .	475
5.8.1. Геоморфологические признаки активного поверхностного складкообразования . . . . .	476
5.8.2. Стратиграфические признаки активного поверхностного складкообразования . . . . .	481
5.8.3. Оценка сейсмической опасности, обусловленной слепыми надвигами . . . . .	486
5.9. Палеосейсмология зон субдукции . . . . .	490
5.9.1. Введение . . . . .	490
5.9.2. Сегментация зон субдукции . . . . .	493
5.9.3. Поверхностное разрывообразование: структуры верхней плиты или структуры на границе плит . . . . .	496
5.9.4. Исторические субдукционные землетрясения как современные аналоги палеоземлетрясений . . . . .	497
5.9.5. Сейсмический деформационный цикл в зонах субдукции . . . . .	502
5.10. Позднечетвертичный уровень моря . . . . .	505
5.10.1. Отметки уровня моря вдоль эрозионных побережий . . . . .	507
5.10.2. Отметки уровня моря вдоль аккумулятивных береговых линий . . . . .	509
5.11. Косейсмический «горизонт землетрясения» . . . . .	511
5.11.1. Характеристика косейсмических горизонтов землетрясения . . . . .	512
5.11.2. Деревья, погубленные землетрясением . . . . .	515
5.11.3. Отложения цунами . . . . .	516
5.11.4. Коралловые атоллы и рифы . . . . .	519
5.11.5. Обобщение стратиграфических признаков палеосейсмичности . . . . .	521
5.12. Палеосейсмологические признаки косейсмического поднятия . . . . .	522
5.12.1. Аляска . . . . .	523
5.12.2. Зона субдукции Каскадия . . . . .	526
5.13. Палеосейсмологические признаки косейсмического опускания . . . . .	531
5.13.1. Аляска . . . . .	531
5.13.2. Зона субдукции Каскадия . . . . .	536
5.13.3. Неоднозначности в характеристике субдукционных палеоземлетрясений . . . . .	541

## **Содержание**

<b>ГЛАВА 6. ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕКТОНИЧЕСКОГО СДВИГА .....</b>	<b>1</b>
6.1. Введение .....	1
6.1.1. Стили, масштабы и обстановки деформаций .....	3
6.1.2. Сегментация сдвигов .....	9
6.1.3. Сейсмический деформационный цикл у сдвигов .....	9
6.1.4. Исторические землетрясения-аналоги .....	11
6.2. Геоморфологические признаки палеоземлетрясений .....	16
6.2.1. Формы рельефа, используемые как маркирующие линии .....	17
6.2.2. Использование сдвиговых смещений для расчетов долговременных скоростей смещения .....	40
6.2.3. Пространственные и временные вариации в поверхностном смещении .....	44
6.2.4. Реконструкция смещений в результате отдельных землетрясений .....	48
6.3. Стратиграфические признаки палеоземлетрясений .....	54
6.3.1. Общий стиль деформаций у сдвиговых разломов в разрезе .....	54
6.3.2. Осадконакопление и выветривание в зонах сдвигов .....	55
6.3.3. Траншейные методы исследований .....	60
6.3.4. Стратиграфические свидетельства палеоземлетрясений .....	65
6.3.5. Измерение латеральных смещений на основе стратиграфических данных .....	75
6.3.6. Распознавание криповых смещений и эпизодических смещений .....	85
6.4. Датирование палеоземлетрясений .....	87
6.5. Интерпретация истории палеоземлетрясений при помощи ретродеформаций .....	91
6.5.1. Ретродеформирование документации траншей .....	92
6.6. Распознавание сейсмогенных и несейсмогенных сдвигов .....	94
6.6.1. Тектонические, но несейсмогенные сдвиги .....	94
6.6.2. Нетектонические и несейсмогенные сдвиги .....	94
<b>ГЛАВА 7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С РАЗЖИЖЕНИЕМ И ДРУГИМИ ЯВЛЕНИЯМИ В РЫХЛЫХ ГРУНТАХ ПРИ ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ.....</b>	<b>96</b>
7.1. Введение .....	96
7.2. Обзор формирования различных проявлений разжижения водонасыщенных грунтов .....	100
7.2.1. Процесс разжижения и флюидизации .....	105
7.2.2. Факторы, влияющие на разжижаемость и эффекты флюидизации ..	108
7.3. Критерии, указывающие на сейсмогенное разжижение .....	112

---

7.4. Избранные исторические и доисторические примеры разжижения водонасыщенных грунтов . . . . .	113
7.4.1. Побережье Южной Каролины . . . . .	114
7.4.2. Нью-Мадридская сейсмическая зона . . . . .	124
7.4.3. Сейсмическая зона долины Вабаш . . . . .	144
7.4.4. Прибрежные районы штата Вашингтон . . . . .	151
7.5. Явления, в целом, несейсмогенной или неясной природы . . . . .	159
7.5.1. Наземные проявления нарушений . . . . .	160
7.5.2. Проявления, сформированные в подводных обстановках . . . . .	162
7.5.3. Формы, образованные выветриванием . . . . .	173
7.5.4. Формы, возникшие в перигляциальных условиях . . . . .	174
7.6. Оценка силы палеоземлетрясений . . . . .	175
7.6.1. Связь с интенсивностью землетрясений по модифицированной шкале Меркалли . . . . .	176
7.6.2. Предел магнитуд . . . . .	176
7.6.3. Приемы, основанные на инженерной практике . . . . .	179
7.6.4. Обзор оценок магнитуды . . . . .	182
7.6.5. Негативные свидетельства . . . . .	183

**ГЛАВА 8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПОЛЗНЕЙ  
ПРИ ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ . . . . .** 185

8.1. Введение . . . . .	185
8.2. Распознавание оползней . . . . .	187
8.3. Определение возраста оползней . . . . .	189
8.3.1. Исторические методы . . . . .	189
8.3.2. Дендрохронология . . . . .	190
8.3.3. Радиометрическое и космогенное датирование . . . . .	191
8.3.4. Лихенометрия . . . . .	192
8.3.5. Корки выветривания . . . . .	192
8.3.6. Палинологический анализ . . . . .	192
8.3.7. Геоморфологический анализ . . . . .	193
8.4. Установление сейсмического генезиса оползней . . . . .	194
8.4.1. Региональный анализ оползней . . . . .	194
8.4.2. Морфология оползней . . . . .	198
8.4.3. Сакунги . . . . .	201
8.4.4. Отложения сейсмогенных оползней . . . . .	204
8.4.5. Оползни, перекрывающие разрывы . . . . .	205
8.4.6. Неустойчивые останцы . . . . .	205
8.4.7. Спелеосейсмология . . . . .	206
8.4.8. Резюме . . . . .	208
8.5. Анализ сейсмического происхождения оползня . . . . .	208
8.5.1. Физические условия формирования оползней в Нью-Мадридской сейсмической зоне . . . . .	209
8.5.2. Геотехнические исследования . . . . .	211

---

8.5.3. Статический (асейсмический) анализ устойчивости склона . . . . .	212
8.5.4. Динамический (сейсмический) анализ устойчивости склона . . . . .	214
8.6. Интерпретация результатов палеосейсмологического изучения оползней . . . . .	229
8.6.1. Характеристика сейсмогенных оползней . . . . .	229
8.6.2. Определение магнитуды и положения эпицентра землетрясения . . . . .	233
8.7. Заключительные комментарии . . . . .	235
<b>ГЛАВА 9. ПРИМЕНЕНИЕ ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ. . . . .</b>	<b>237</b>
9.1. Введение . . . . .	237
9.1.1. Оценка сейсмической опасности: краткое описание . . . . .	241
9.2. Оценка магнитуды палеоземлетрясения . . . . .	244
9.2.1. Методы, использующие первичные дислокации . . . . .	246
9.2.2. Методы, использующие вторичные сейсмодислокации . . . . .	267
9.3. Средние скорости палеосейсмического смещения по разломам и повторяемость палеоземлетрясений . . . . .	268
9.3.1. Построение графиков истории смещения временные вариации смещения в данной точке . . . . .	269
9.3.2. Средние скорости смещений . . . . .	274
9.3.3. Графики распределения смещения вдоль разрыва совместное отображение пространственных и временных изменений величины подвижки вдоль простириания разрыва . . . . .	280
9.3.4. Оценка повторяемости с использованием средних скоростей смещения . . . . .	284
9.3.5. Оценка повторяемости с помощью абсолютного датирования палеоземлетрясений . . . . .	286
9.3.6. Построение пространственно-временных диаграмм . . . . .	288
9.3.7. Интерпретация пространственно-временных диаграмм для установления синхронности палеоземлетрясений и выявления многосегментных разрывов . . . . .	293
9.4. Сегментация разрывов . . . . .	295
9.4.1. Сейсмогенерирующие сегменты . . . . .	298
9.4.2. Сегменты разломов . . . . .	299
9.4.3. Границы сегментов . . . . .	301
9.4.4. Поведение границ сегментов . . . . .	302
9.4.5. Сегментация исторических поверхностных разрывов . . . . .	304
9.4.6. Полезна ли концепция сегментации? . . . . .	304
9.5. Модели поведения разломов . . . . .	308
9.5.1. Модели с изменяющимся смещением . . . . .	310
9.5.2. Модели с одинаковым смещением . . . . .	310
9.6. Модели повторяемости землетрясений . . . . .	313
9.6.1. Статистический анализ хронологии палеоземлетрясений . . . . .	316
9.6.2. Временная кластеризация, «влияние» разлома и механизмы, приводящие к нерегулярной повторяемости . . . . .	323

---

9.6.3. Использование данных о повторяемости для оценки условной вероятности будущей подвижки по разлому . . . . .	328
9.7. Использование палеосейсмологических данных при детерминистском и вероятностном анализе сейсмической опасности . . . . .	332
9.7.1. Детерминистская оценка сейсмической опасности . . . . .	332
9.7.2. Вероятностная оценка сейсмической опасности в виде Национальных карт сейсмической опасности . . . . .	336
9.7.3. Вероятностный анализ сейсмической опасности для участков и регионов: искусство логических деревьев. . . . .	338
9.7.4. Вероятностная опасность подвижки по разлому . . . . .	356
9.8. Изучение возможности поверхностного разрывообразования на участке строительства . . . . .	359
9.8.1. Выявление четвертичных разломов на площадке . . . . .	360
9.8.2. Тщательное выделение разломов и определение их положения . . . . .	360
9.8.3. Определение возраста последней подвижки по поверхностному разрыву и класса активности разлома . . . . .	364
9.8.4. Использование палеосейсмологических данных о величине подвижки для выработки рекомендаций о ширине зоны вдоль разлома, запретной для строительства . . . . .	368
9.9. Применение палеосейсмологических данных при неотектонических исследованиях . . . . .	371
9.10. Существующие проблемы в палеосейсмологии и ее дальнейшее развитие . . . . .	372
9.10.1. Распознавание палеоземлетрясений. . . . .	373
9.10.2. Оценка смещения/магнитуды . . . . .	375
9.10.3. Оценка возраста/повторяемости. . . . .	375
9.10.4. Проверка моделей поведения разломов . . . . .	376
9.10.5. Научная стратегия . . . . .	377
<b>Приложение 1. МАГНИТУДНЫЕ ШКАЛЫ . . . . .</b>	<b>379</b>
A.1.1. Локальная (Рихтеровская) Магнитуда ( $M_L$ ) . . . . .	379
A.1.2. Магнитуда по поверхностным волнам ( $M_S$ ) . . . . .	380
A.1.3. Магнитуда по объемным волнам ( $m_{bLg}$ ) . . . . .	381
A.1.4. Моментная магнитуда ( $M_w$ ИЛИ $M$ ) . . . . .	381
<b>Приложение 2. МЕТОДЫ ОТБОРА ОБРАЗЦОВ НА <math>^{14}\text{C}</math> . . . . .</b>	<b>383</b>
A.2.1. Сколько отбирать . . . . .	383
A.2.2. Предварительная обработка образцов . . . . .	383
<b>Приложение 3. ПОЛЕВОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗЖИЖАЕМОСТИ ГРУНТОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ . . . . .</b>	<b>385</b>