

УДК 551.243

АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАМЧАТКИ: ПАРАМЕТРЫ, СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ

Кожурин А.И.^{1,2}

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, anivko@yandex.ru

²Геологический институт РАН, г. Москва

Введение

Изучение активных разломов важно по двум причинам. Во-первых, параметры этих разломов (направление и средняя скорость движений по ним) указывают на режим деформирования того или иного объема земной коры, а также на возможную причину деформаций. Во-вторых, восстановление величин разовых подвижек по активным разломам и интервала их повторяемости позволяют примерно оценивать степень связанной с ними сейсмической опасности.

Методика

Способы обнаружения и картирования активных разломов известны и подробно описаны [10]. Необходимым и достаточным критерием для этого является наличие деформаций позднелепестово-голоценовых форм рельефа различного генезиса, а наиболее эффективным инструментом для их распознавания - дешифрирование космических и аэрофотоснимков, а также цифровых моделей рельефа. Уже на стадии дешифрирования часто оказывается возможным определить направление движения по разлому, то есть его кинематику. Важным дополнением является изучение нарушенных активным разломом молодых отложений, которое обеспечивается проходкой канав поперек его линии. Помимо получения прямых свидетельств о типе вертикальных смещений (взброс, сброс), при этом оказывается возможным выделить отдельные подвижки, определение их величины (а, значит, и примерной магнитуды вызванного подвижкой землетрясения), возраста, средней величины интервала их повторяемости (то есть, в совокупности, сейсмического потенциала).

Активные разломы Камчатки: распространение, кинематика, геодинамические обстановки

Большое количество активных разломов на Камчатке свидетельствует о том, что ее земная кора, при поддвиге под нее Тихоокеанской плиты, не остается монолитной и инертной, деформируется. Выделяются две пространственно разобщенные группы разломов разной кинематики, отражающие два режима деформирования земной коры островной дуги (рис. 1). Во-первых, это сбросы восточного ограничения Центральной Камчатской депрессии (Восточно-Камчатская зона разломов), во-вторых – сдвиги (в основном, правые) и взбросо-надвиги Камчатского полуострова.

Сбросы Восточно-Камчатской зоны имеют, как правило, северо-западное падение, листрическую морфологию (плоскости становятся положе с глубиной), и отражают поперечное растяжение земной коры Центральной Камчатки. На большей части Восточно-Камчатской зоны вертикальная компонента в движениях по разломам доминирует, однако на севере, в район хр. Кумроч, к ней добавляется правосдвиговая компонента, достигающая величины вертикальной. Единственным предложенным к настоящему времени объяснением формирования и развития камчатских сбросов является представление об отступании в сторону океана погруженной части Тихоокеанской плиты и желоба [13]. Северное ограничение части Центральной Камчатки, охваченной направленным в сторону океана растяжением, примерно совпадает с проекцией на Камчатку Алеутского трансформного разлома, южное – с т.н. Начикинской зоной поперечных дислокаций (широкая правосдвиговая зона с компонентой растяжения). Средняя за средний неоплейстоцен - голоцен скорость растяжения Центральной Камчатки достигает примерно 17 мм в год, из которых примерно 13 мм в год приходятся на Восточно-Камчатскую зону разломов, 4 мм в год – на растяжение в осевой части Восточного вулканического фронта [13].

Структурный парагенез активных сдвигов и взбросо-надвигов Камчатского полуострова свидетельствуют, напротив, о примерно поперечном Камчатке сокращении ее земной коры и пододвигании блока полуострова под поднятие северной части хр. Кумроч. В целом, структурные

данные, а также, независимо, данные GPS-измерений [4, 5], подтверждают представление об активной коллизии западных Алеут с Камчаткой [12].

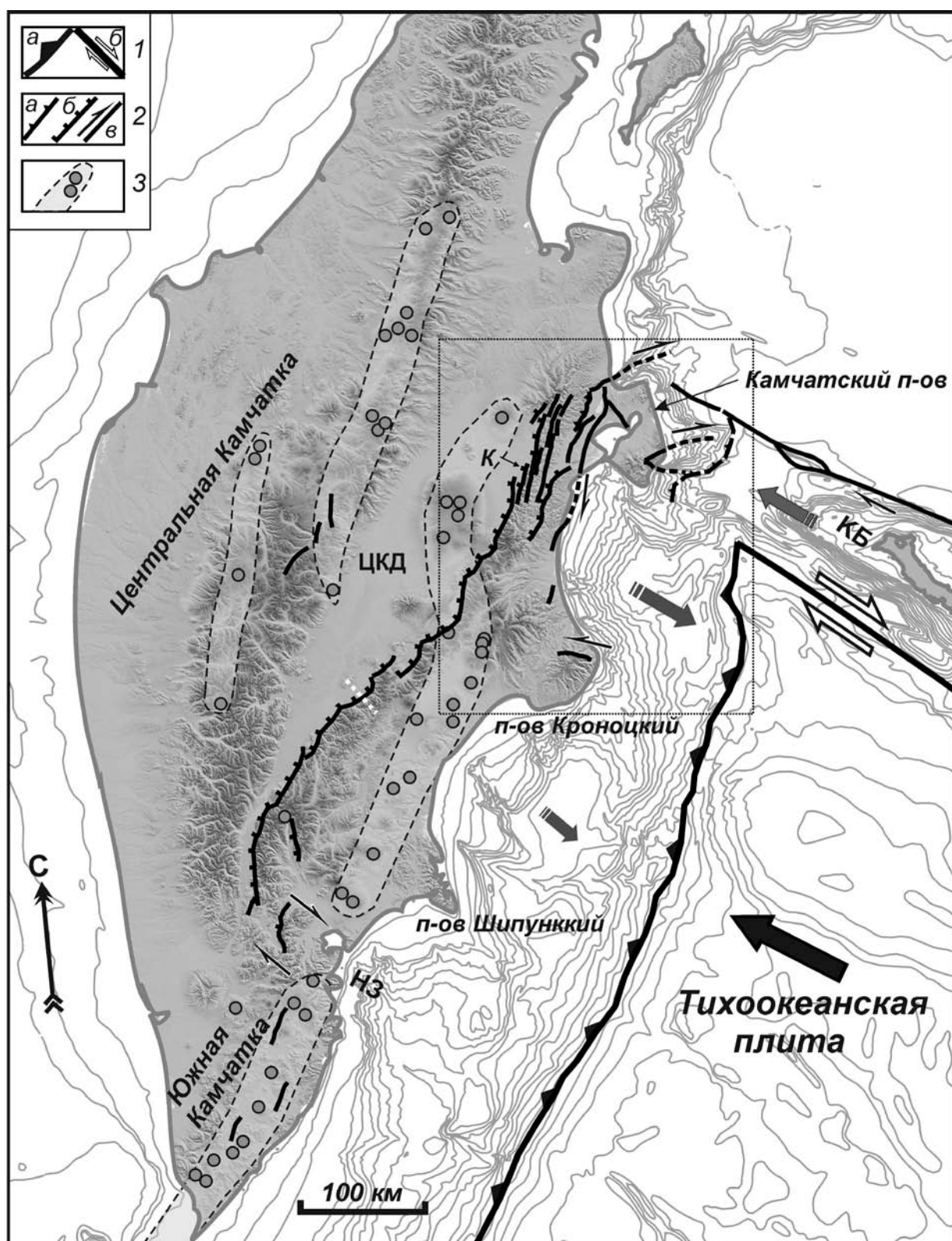


Рис. 1. Активные разломы Камчатки (генерализованы). 1 – ось глубоководного желоба (а) и Алеутский трансформный разлом (б); 2 – взбросы-надвиги (а), сбросы (б) и сдвиги (в), 3 – позднечетвертичные вулканические центры и примерные контуры вулканических поясов. ЦКД – Центральная Камчатская депрессия, К – хр. Кумрош, НЗ – Начикинская зона поперечных дислокаций, КБ – Командорский блок. Большие черная и серые стрелки – направления относительных движений океанической плиты, востока Камчатки и Командорского блока). Батиметрия – по [9]. Прямоугольник – положение рис. 2, белая пунктирная линия – профиля на рис. 3.

Одновременное существование двух диаметрально разных геодинамических процессов – поперечного Камчатке растяжения и поперечного к ней сокращения земной коры – ставит вопрос о соотношении между собой создаваемых ими структур. Наиболее простой мыслимый вариант – наличие крупного левосдвигового разлома, пересекающий хр. Кумроч примерно на продолжении Алеутского трансформного разлома, однако такого разлома нет. Другой вариант – заменяющая его относительно широкая горизонтальная левосдвиговая флексура (изгиб в плане). К особенностям, находящим объяснение в рамках модели горизонтальной флексуры, относятся следующие (рис. 2).

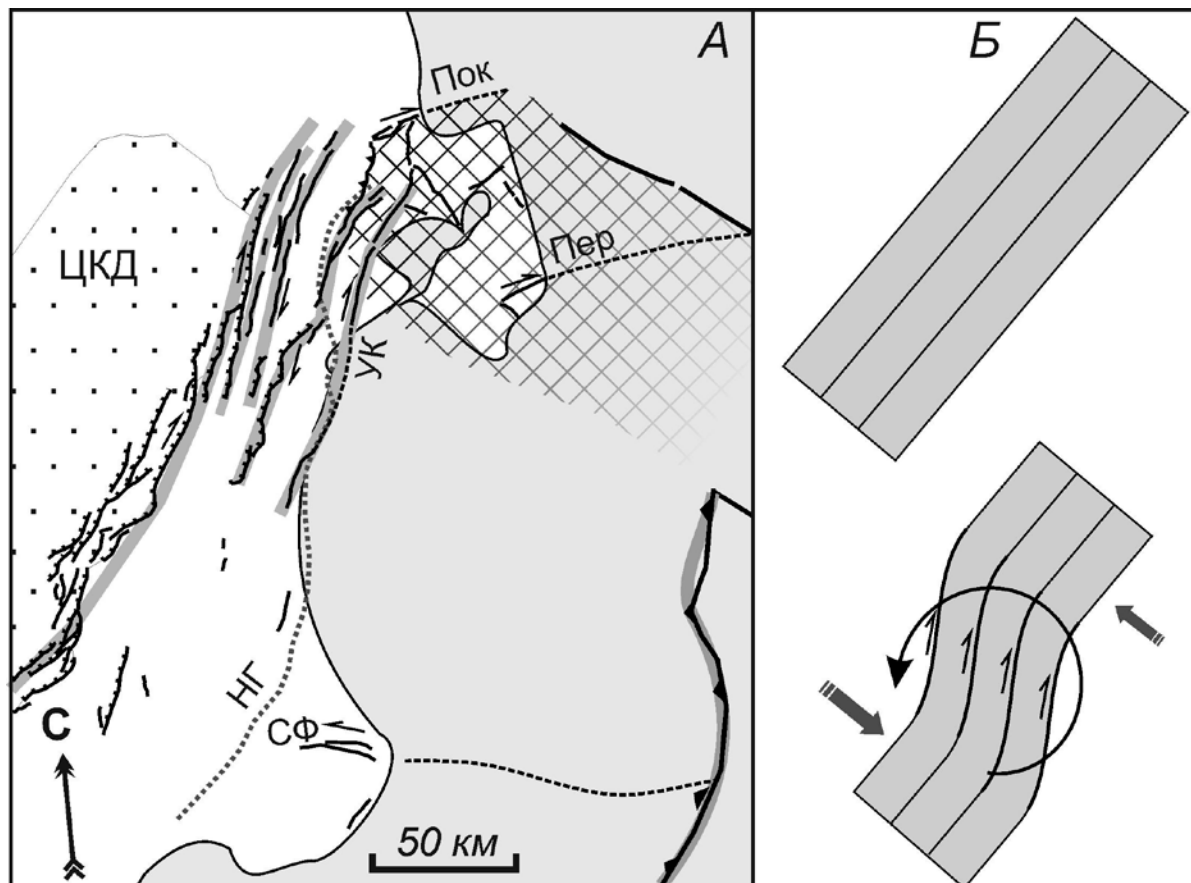


Рис. 2. А – изгиб в плане активных и неактивных разломных структур в зоне перехода между коллизийными структурами и структурами надсубдукционного растяжения. Пок – разлом Покатый, Пер – разлом 2-й Перевальский, УК – Усть-Камчатский разлом, СФ – «Северный фас» Кроноцкого полуострова, НГ – неактивный надвиг Гречишкина. Толстые серые линии – аппроксимация простирианий активных разломов и оси глубоководного желоба. Б – идеализированная схема горизонтальной флексуры (вверху – исходное состояние, внизу – после деформации). Утолщенные линии на рисунке внизу – участки послойного скольжения. Остальные обозначения см. на рис. 1.

1) Разворот против часовой стрелки (с приближением простирианий к меридиональному) северного ограничения ЦКД и доновейших геологических образований (напр., линии надвига Гречишкина, см. рис. 2).

2) Такой же разворот, с отклонением ближе к меридиональному направлению, оси глубоководного желоба севернее широты Кроноцкого полуострова – особенность его плановой геометрии, на которую первым обратил внимание С.А. Федотов [11]. Такое же отклонение испытывают более глубокие горизонты погруженной части океанической плиты, с чем, очевидно, связано перемещение вулканических проявлений в Центральную Камчатскую депрессию (см. рис. 1).

3) Наличие правосдвиговой компоненты в движениях по сбросам в северной части Восточно-Камчатской зоны разломов и правосдвиговая кинематика серии разломов внутри поднятия хр. Кумроч, ожидаемые при таком вращении (см. рис. 2). Крайним к востоку правосдвиговым разломом этой серии может быть т.н. Усть-Камчатский разлом уже на Камчатском полуострове, правосдвиговая кинематика которого следует из структурных данных [8].

4) Модель горизонтальной флексуры объясняет появление активного разлома северо-западного простириания на Кроноцком полуострове (рис. 1, 2). Этот разлом – единственный активный

из системы разломов, выделенной ранее В.А. Леглером и названной им «Северным фасом» [7]. Кинематику зоны В.А. Леглер определил как левосдвиговую. Данных о кинематике активного разлома пока нет, но если она левосдвиговая, то разлом мог появиться как осложняющий передовое крыло флексуры. Если это так, то под водой разлом должен распространяться к месту изгиба оси глубоководного желоба.

Сейсмический потенциал

Особенность камчатских сбросов – относительно малые углы падения их плоскостей в верхней части (30–40°) и, вероятнее всего, листрическая морфология [6, 13]. Ширина ЦКД в ее широкой части и примерные значения величины накопленного за средне-позднечетвертичное время смещения позволяют оценить глубину возможной субгоризонтальной поверхности срыва [16], с которой нижние части сбросов могут сливаться, значением порядка 20 км. Эпицентры слабых коровых землетрясений Центральной Камчатки расположены, в основном, в западном крыле Восточно-Камчатской зоны, не ближе 7 – 15 км от нее. При таком расстоянии от зоны гипоцентры землетрясений оказываются пространственно приуроченными к нижним пологим (возможно, почти горизонтальным) частям плоскостей сбросов (рис. 3). Можно предположить, что движения в нижних частях сбросов происходят в близком к криповому режиме, то есть без генерации сильных

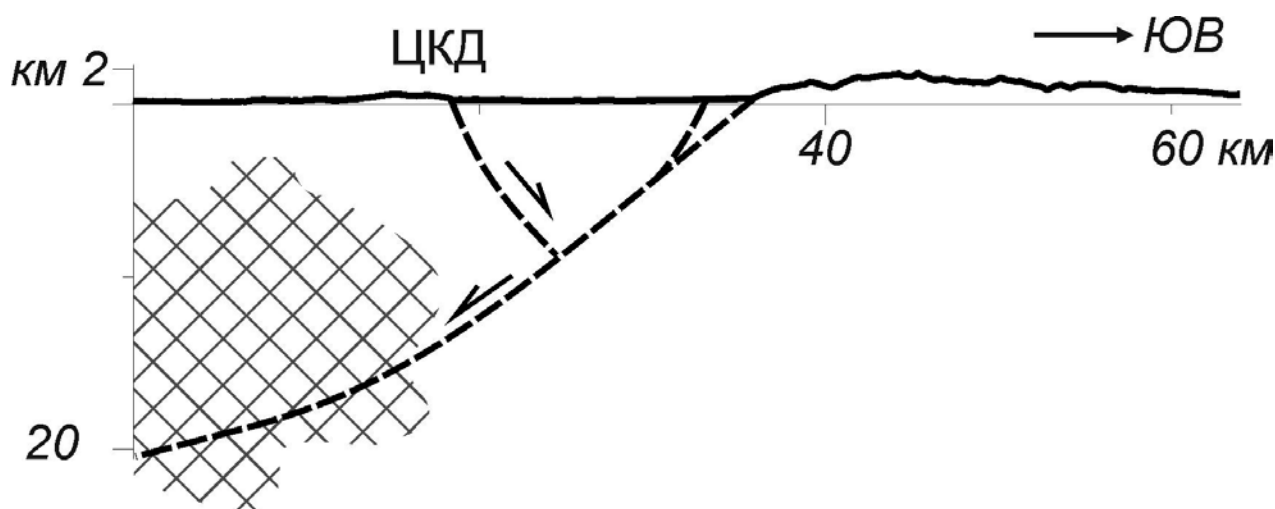


Рис. 3. Схематический профиль через Восточно-Камчатскую зону разломов (положение см. на рис. 1). Стрелки – относительные движения по сбросам, штриховка – область гипоцентров слабых коровых землетрясений в западном крыле зоны.

землетрясений. В относительно крутых верхних частях сбросов напряжения, очевидно, накапливаются длительное время, без их релаксации частыми небольшими подвижками. По данным изучения деформированных разломами рыхлых отложений, интервал повторяемости между относительно большими подвижками (то есть между сильными землетрясениями) по сбросам Восточно-Камчатской зоны составляет от 1 до 4 – 5 тыс. лет, но может достигать и больших, 9 – 10 тыс. лет, значений. Измеренные величины разовых подвижек составляют порядка 1 м [1, 14]. При таких значениях максимальная моментная магнитуда генерируемых землетрясений, вычисляемая по разным регрессиям [15, 17], не превышает 6.6 – 6.8.

Полные длины ни одного из изученных сдвиговых коллизионных разломов на Камчатском полуострове неизвестны – все они одним из своих окончаний скрываются под водой (см. рис. 2). Величина полной разовой подвижки по разлому Покатый, который ограничивает блок полуострова с севера, составляет примерно 5 м [3], что соответствует M_w от ~7.5 [17] до 8.1 – 8.2 [15]. Второе значение кажется преувеличенным, нуждающимся в подтверждении. Установленные интервалы между подвижками по разлому – порядка 2 тыс. лет и 3.5 тыс. лет. Примерно через такие же по продолжительности интервалы времени происходят подвижки по Усть-Камчатскому разлому [8].

Разлом 2-й Перевальный, представляющий элемент внутренней деформации блока полуострова – наиболее «быстрый» (скорость до 20 мм в год) правосдвиговой разлом на Камчатке [2]. При минимальных установленных смещениях в 2–3 м интервалы времени между подвижками оказываются очень короткими – 100 – 200 лет. Магнитуды генерируемых землетрясений при таких смещениях могут достигать значения примерно в 7.3 [15, 17].

Заключение

Предложенная модель горизонтальной флексуры (пластический изгиб при подчиненной роли хрупких деформаций) – первая, описывающая способ перехода между коллизионными структурами Камчатского полуострова и структурами надсубдукционного растяжения Центральной Камчатки. Важно отметить, что элементом флексуры является также зона субдукции (погруженная под Камчатку часть океанической плиты). В целом, появление флексуры и ее развитие можно представить таким образом, что сближение западных Алеут (Командорского блока) с Камчаткой тормозит расширение ее северной части в сторону океана.

Интервалы подвижек по активным разломам Камчатки, независимо от их кинематики, исчисляются величинами в первые тысячи лет (исключение – разлом 2-й Перевальный на Камчатском полуострове). Большая продолжительность интервалов повторяемости подвижек по сбросам Восточно-Камчатской зоны, связана, возможно, с тем, что значительная часть напряжений снимается при относительно частых слабых коровых землетрясениях. Магнитуды возможных генерируемых землетрясений, очевидно, выше для разломов коллизионного происхождения. Получение более точных, по сравнению с приведенными, оценок параметров активных разломов Камчатки требует дополнительных специальных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 16-05-00090 и 18-05-00407.

Список литературы

1. Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К. Активная разломная тектоника юга Центральной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. Вып. 12. № 2. С. 10–27.
2. Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В., Зеленин Е.А., Михайлюкова П.Г. Скорость коллизионных деформаций полуострова Камчатский (Камчатка) // Геотектоника. 2014. № 2. С. 42–60.
3. Кожурин А.И., Пинегина Т.К. Активные разломные деформации полуострова Камчатский // Материалы конференции. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: Геофизическая служба РАН, 2013.
4. Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Титков Н.Н., Сероветников С.С., Магуськин М.А., Ландер А.В. Исследования современных движений земной коры (СЗДК) на Камчатке // Физика Земли. 2014. № 6. С. 17–36.
5. Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф., Павлов В.М., Титков Н.Г. Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 54–68.
6. Леглер В.А. Деформация погружающейся литосферной плиты и продольные сдвиги Курило-Камчатской островной дуги // Тектоника литосферных плит (динамика зоны поддвига). Институт океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР, М.: 1976. С. 103–147.
7. Леглер В.А., Парфенов Л.М. Системы разломов островных дуг // Тектоническое районирование и структурно-вещественная эволюция Северо-Востока Азии. М.: Наука, 1979. С. 134–156.
8. Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. Оценка сейсмической и цунамиопасности для поселка Усть-Камчатск (Камчатка) по данным палеосейсмологических исследований // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. Вып. 19. № 1. С. 138–159.
9. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: изд-во КамГУ, 2009. 191 с.
10. Трифонов В.Г., Кожурин А.И. Проблемы изучения активных разломов // Геотектоника. 2010. № 6. С. 79–98.
11. Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В., Шумилина Г.С. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91–107.
12. Geist E.L., Scholl D.W. Large-scale deformation related to the collision of the Aleutian Arc with Kamchatka // Tectonics. 1994. V. 13. P. 538–560.
13. Kozhurin A.I., Zelenin E.A. An extending island arc: The case of Kamchatka // Tectonophysics. 2017. V. 706. P. 91–102. doi: 10.1016/j.tecto.2017.04.001.
14. Kozhurin A.I., Acocella V., Kyle P.R. et al. Trenching active faults in Kamchatka, Russia: paleoseismological and tectonic implications // Tectonophysics. 2006. V. 417. P. 285–304.
15. Leonard, Mark. Earthquake Fault Scaling: Self-Consistent Relating of Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release // Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. V. 100. № 5A. P. 1971–1988. doi: 10.1785/0120090189.
16. Poblet, Josep., Bulnes, Mayte. Fault-slip, bed-length and area variations in experimental rollover anticlines over listric normal faults: influence in extension and depth to detachment estimations // Tectonophysics. 2005. V. 396. P. 97–117.
17. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seism. Soc. Am. 1994. V. 84. № 4. P. 974–1002.

АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАМЧАТКИ: ПАРАМЕТРЫ, СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ

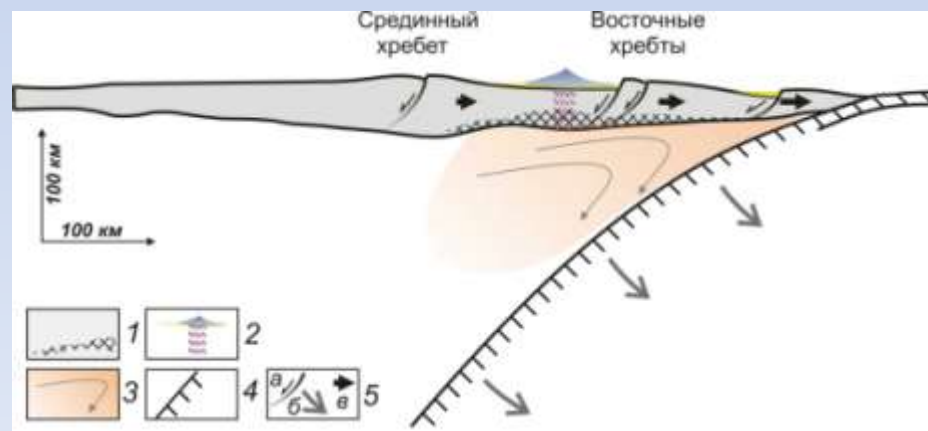
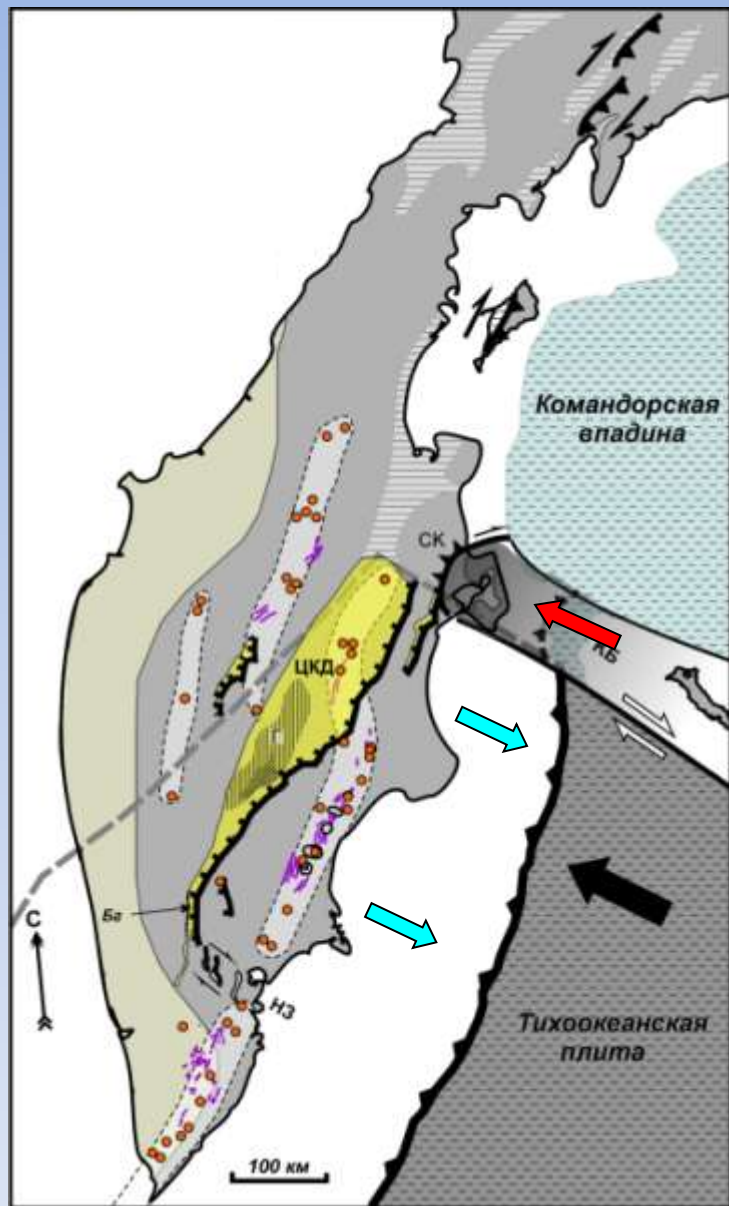
*А.И. Кожурин
Институт вулканологии и
сейсмологии ДВО РАН*



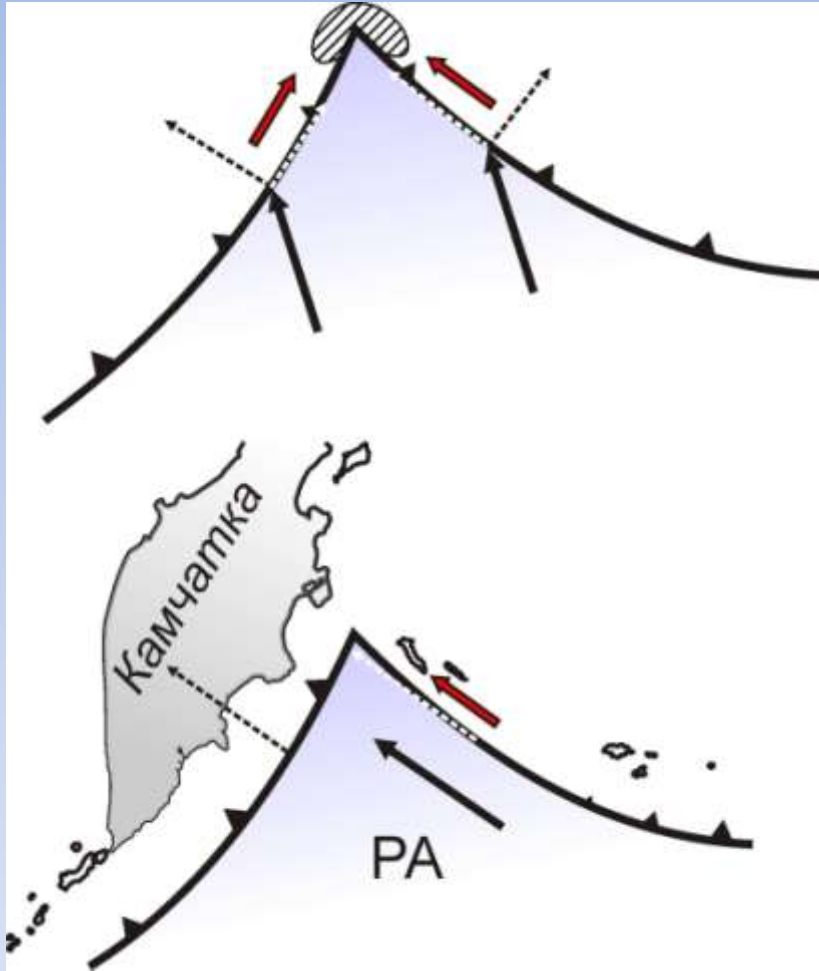
1. Две геодинамические обстановки –
два типа активных разломов и их
сочетаний

2. Структура перехода от одного типа
деформирования земной коры
Центральной Камчатки к другому

3. Сейсмический потенциал разломов
разных геодинамических обстановок
($M_{\max}$, периоды повторяемости)



Причина (источник) коллизии типа дуга-дуга (дуга-континент) – тангенциальная компонента в движении океанической плиты относительно дуг



Общий случай – тангенциальная компонента есть на каждой из соседних дуг

Частный случай (случай Камчатки) – тангенциальная компонента на одной дуге, ортогональная – на другой

Почему растяжение в дуге?

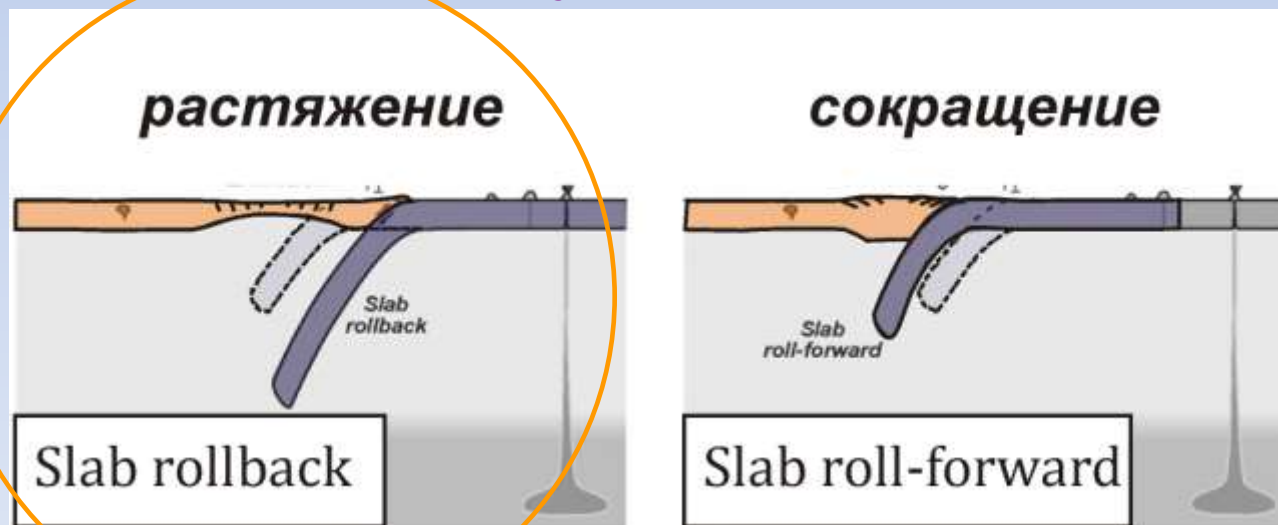


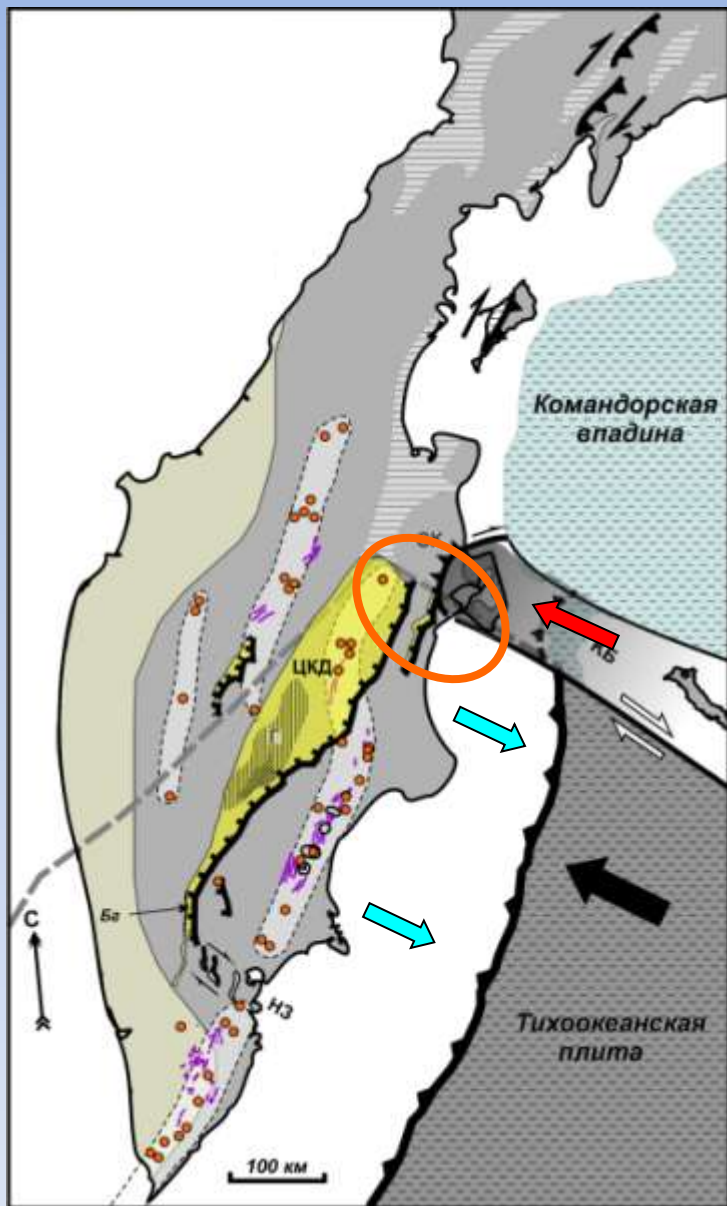
Алеутский трансформный разлом –
северный край Тихоокеанской плиты

Растяжение в дугах:

- 1) рядом краем погружающейся плиты,
- 2) малых по протяженности дуг (напр., Скоша, Антильской)

случай Камчатки

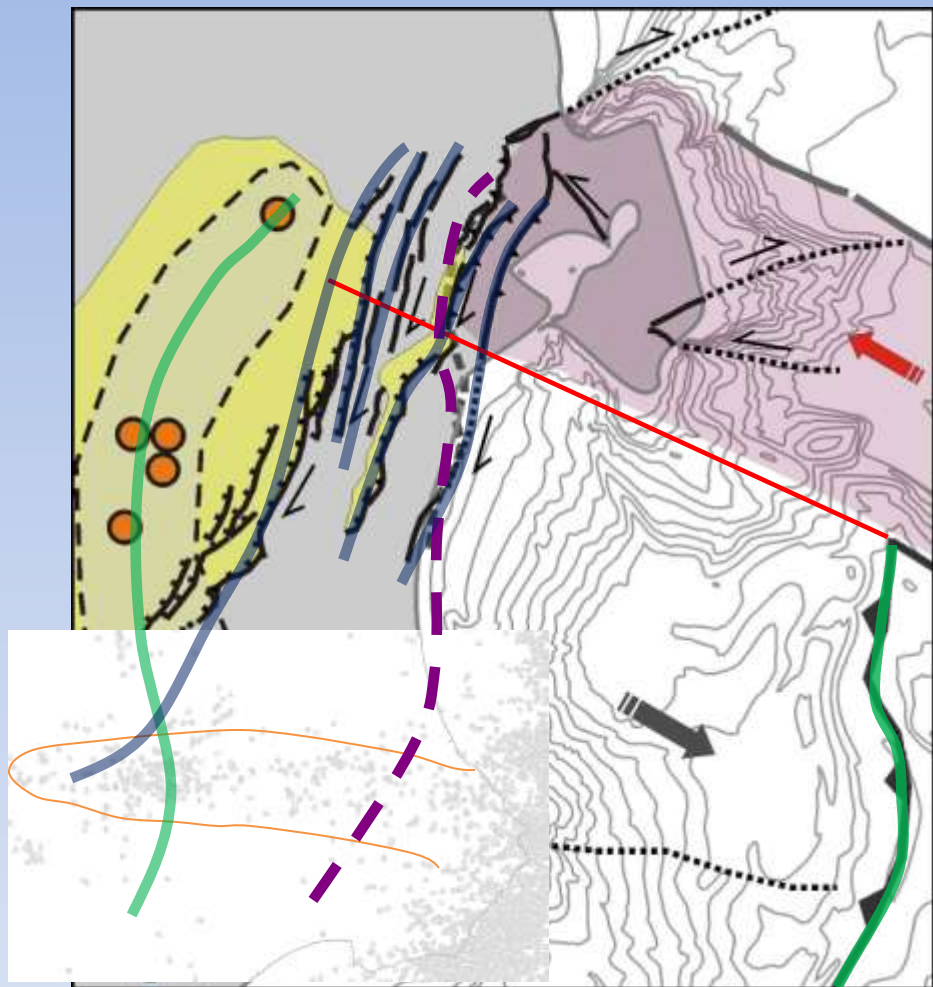




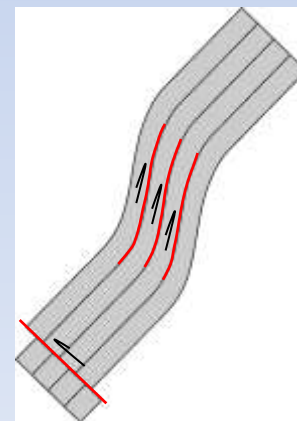
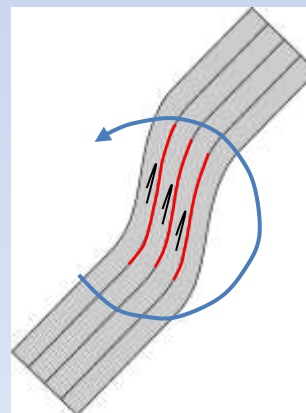
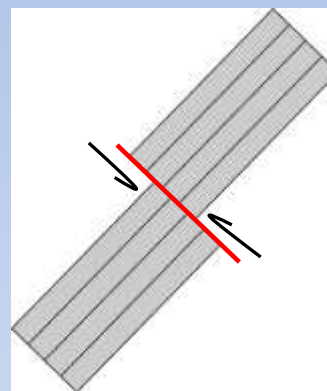
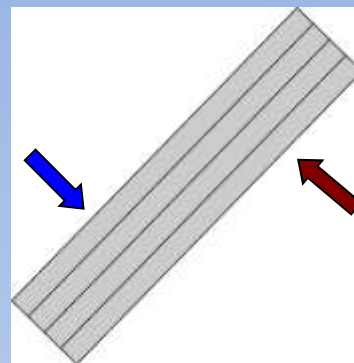
Должен быть переход (вдоль дуги) от структур сокращения к структурам растяжения!

Как это происходит?

Структурное решение



горизонтальная флексура



Переход от структур поперечного растяжения Центральной Камчатки к коллизионным структурам поперечного сокращения земной коры Камчатского полуострова осуществляется через горизонтальную левосдвиговую флексуру (изгиб).

Горизонтальная флексура объясняет:

1. Существование серии разрывов в поднятии хр. Кумроч (в других хребтах таких разрывов нет)
2. Существование правосдвиговой компоненты в движениях по этим разрывам
3. Изгиб, с вращением против часовой стрелки, линии желоба, оси вулканического пояса и дочетвертичных структур (например, линии надвига Гречишкина)
4. Существование на Кроноцком полуострове левосдвигового (по Леглер, Парфенов, 1979) субширотного разлома, а также роя слабых землетрясений того же простирания, в котором разлом находится.

Сейсмический
потенциал



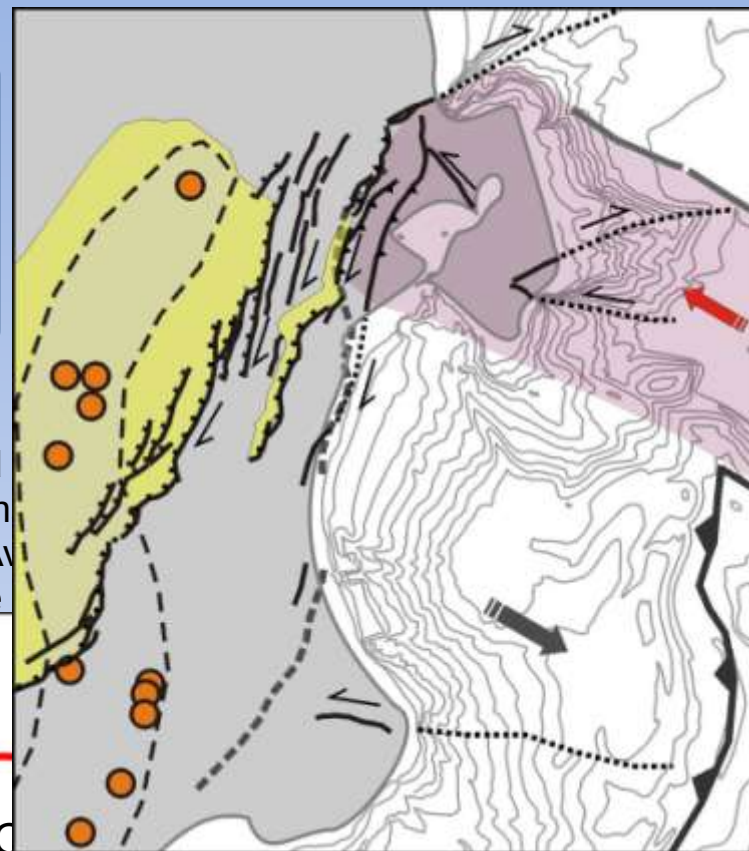
$M_{\max}$
+
повторяемость
+
возраст последней
подвижки

$M_{\max}$



длина разрыва
величина разовой

Leonard
Self-Con
Width, Av
Release

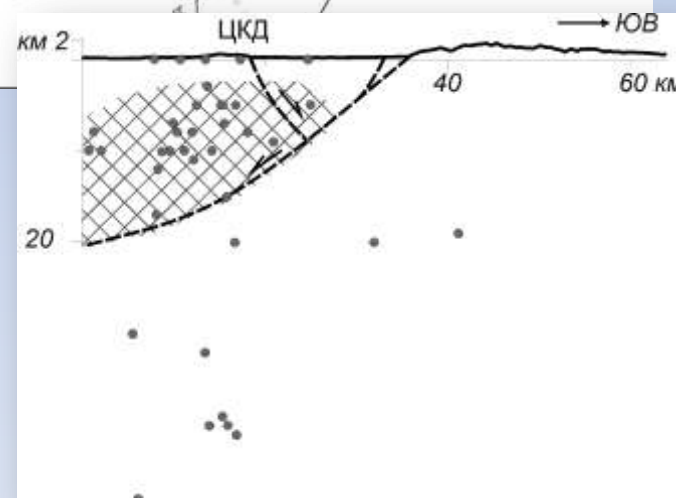
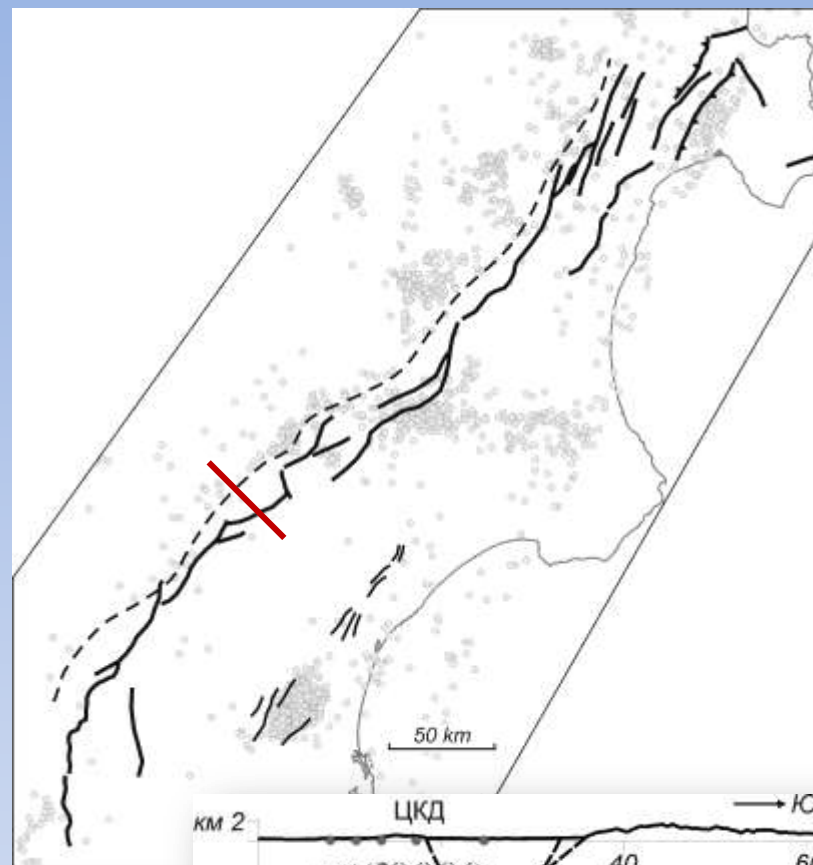
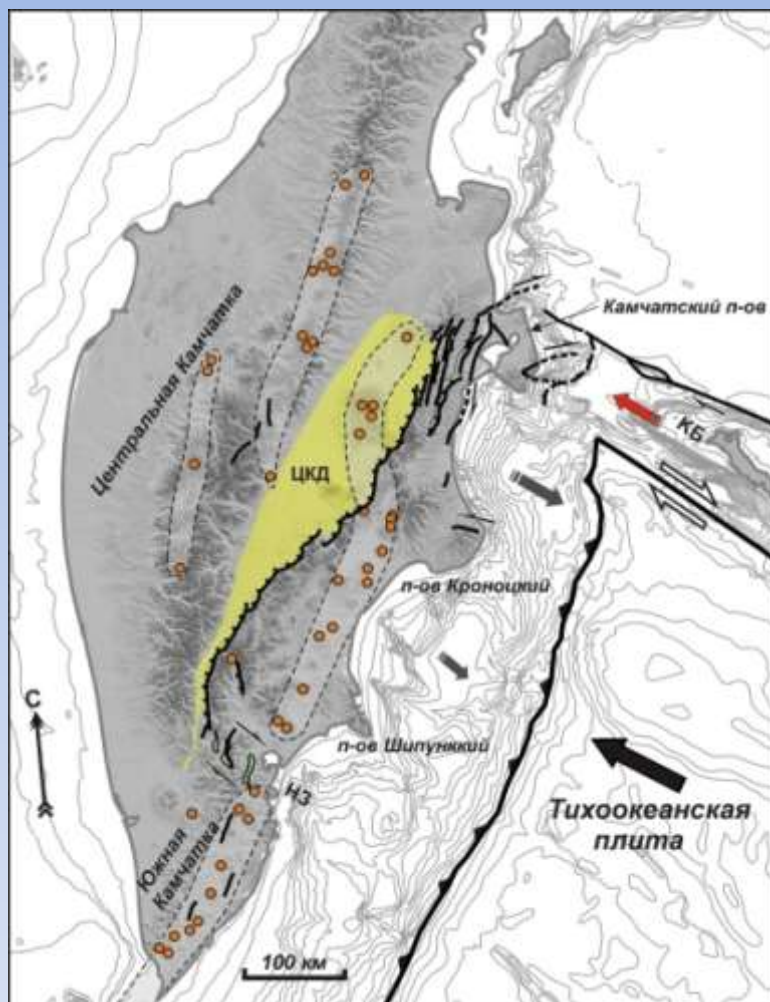


ement,
Am. 84, no. 4, 974–1002.



Сбросы Центральной Камчатки

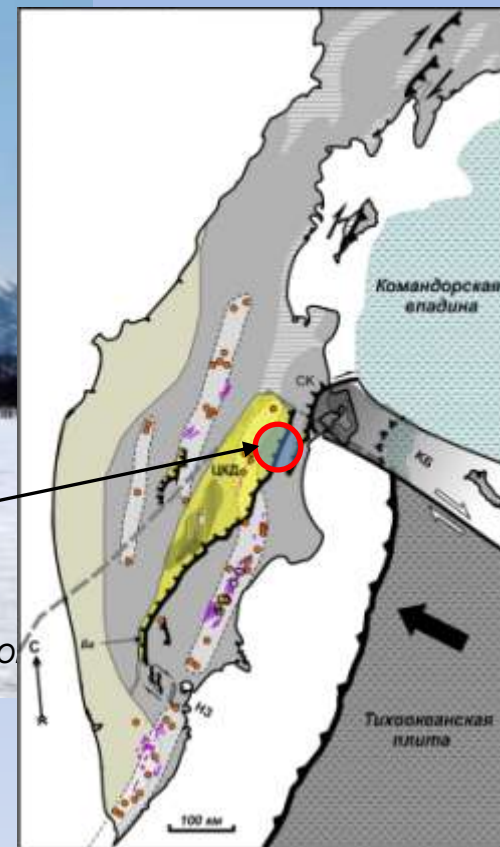
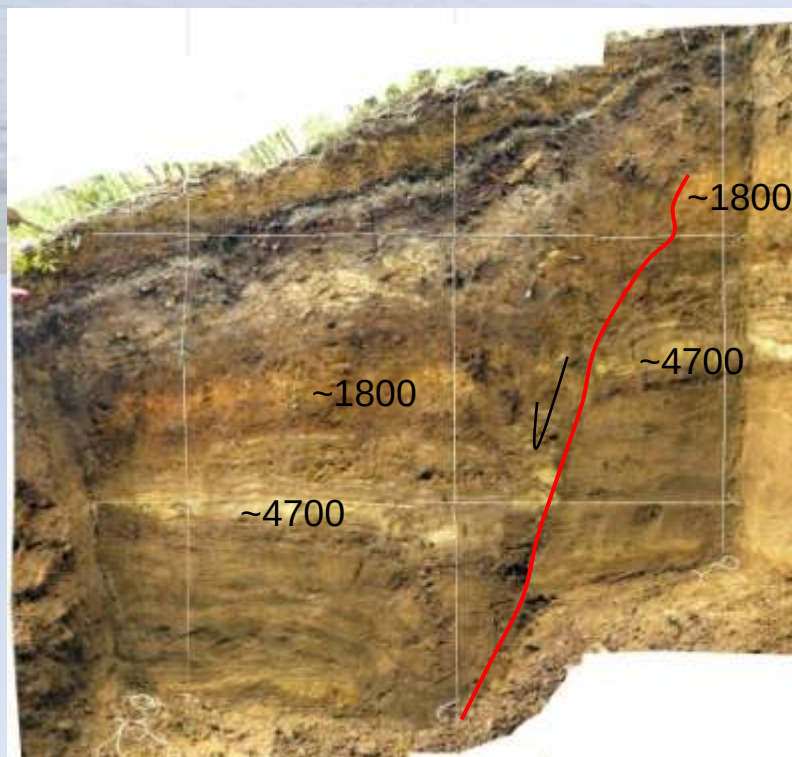
Листрические сбросы



Коровые (0 – 35 км) землетрясения
с $M \geq 3.5$ за 1962-2014 г.г.,

www.emsd.ru/sdis/. Возможно, приурочены к нижним, более пологим, частям сбросов

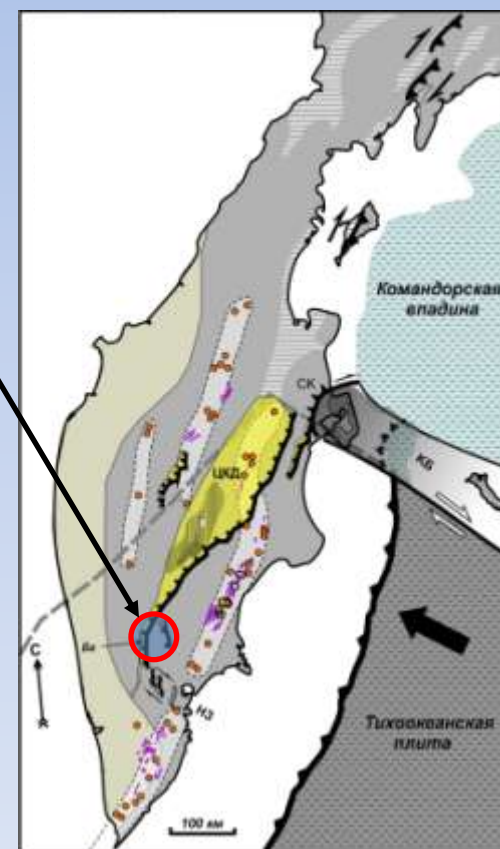
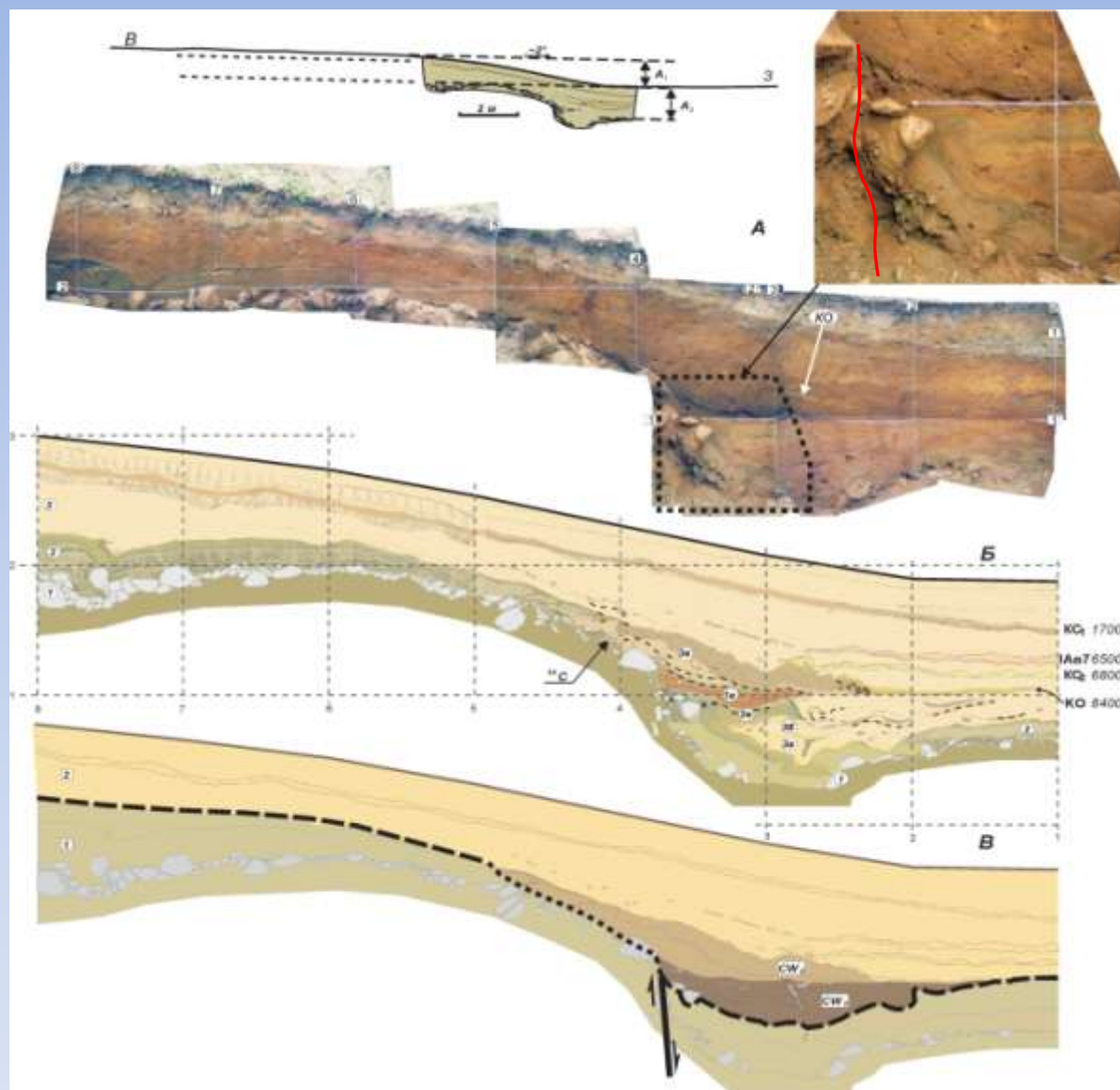
Фасеты на склоне восточного ограничения Центральной Камчатской депрессии – результат сбросовых движений



вид на Ю

*одна подвижка примерно на 0.8 м
(по вертикали) после ~ 1800 л.н.
в последние примерно 5 тыс. лет*

*Плоскость сброса в молодых рыхлых
отложениях*



одна подвижка примерно на 1.4 м
(по плоскости, общая) примерно 9 тыс. л.н.



*Разломная плоскость на коренных породах под
сбросовой фасетой (Ганальский хр.)*

Средняя разовая подвижка - 1 м  $M_{\max} \sim 6.6-6.8$

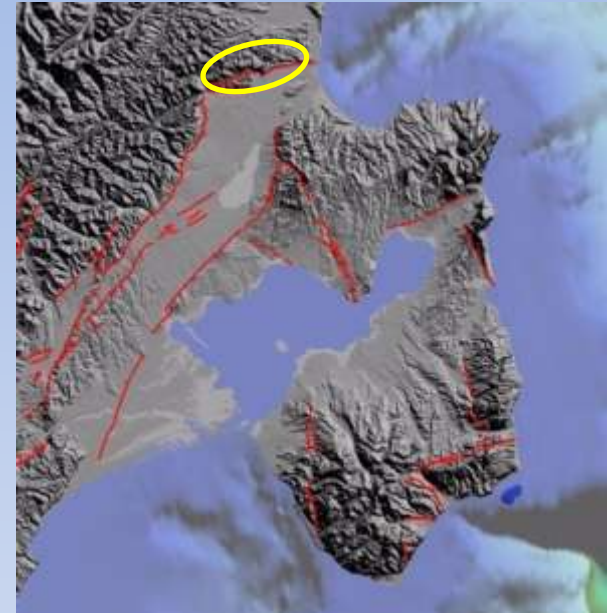
Интервал повторяемости – первые тысячи лет

Коллизионные взбросо-сдвиги Камчатского полуострова

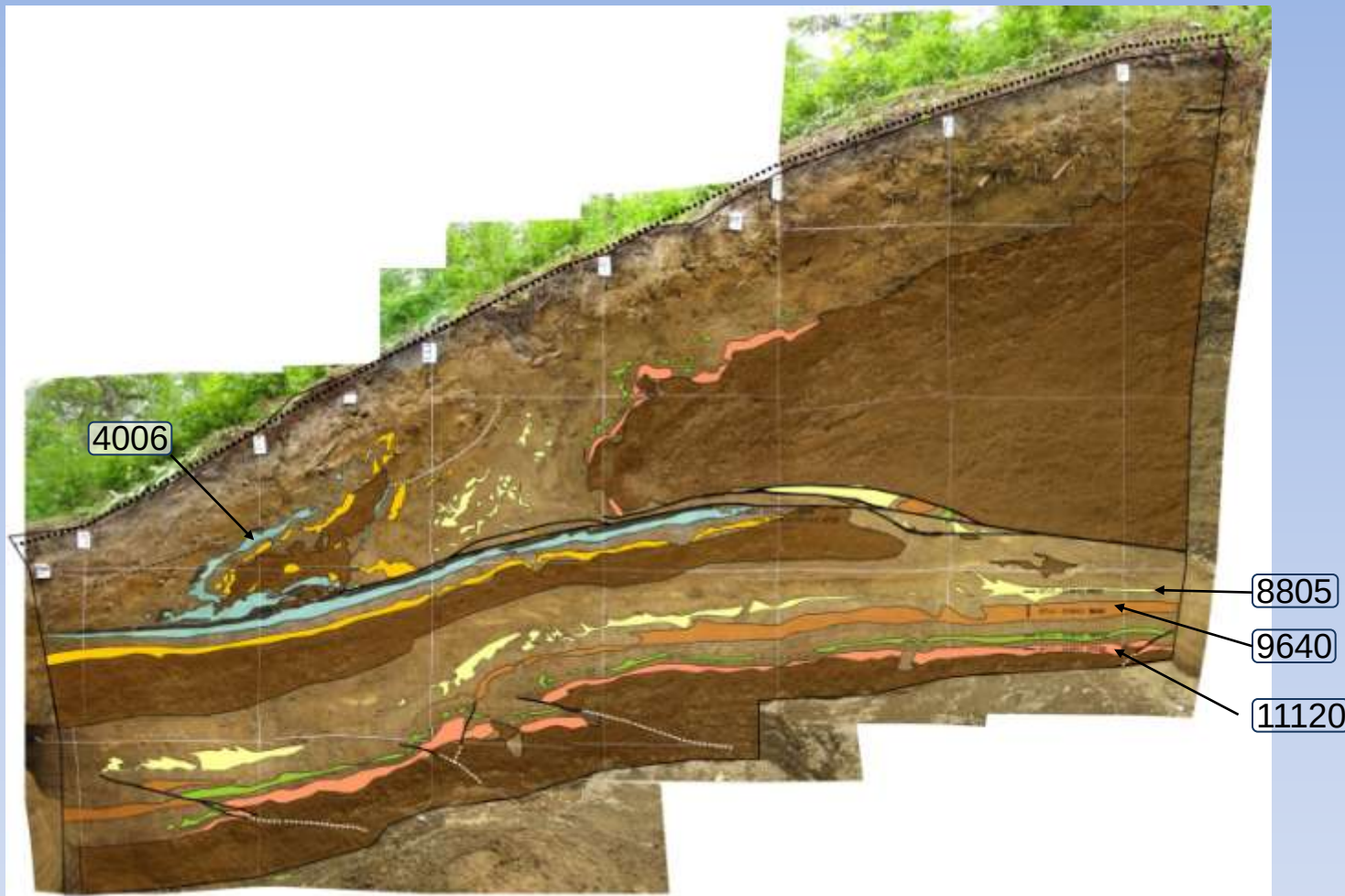
*Разлом северного ограничения блока Камчатского полуострова –
правосторонний сдвиг + сжатие. Скорость сдвига ~ 1 мм/г (тах)*



один и тот же слой: «сдваивание»
разреза



правый сдвиг ложбин и
врезов на 4.5 м



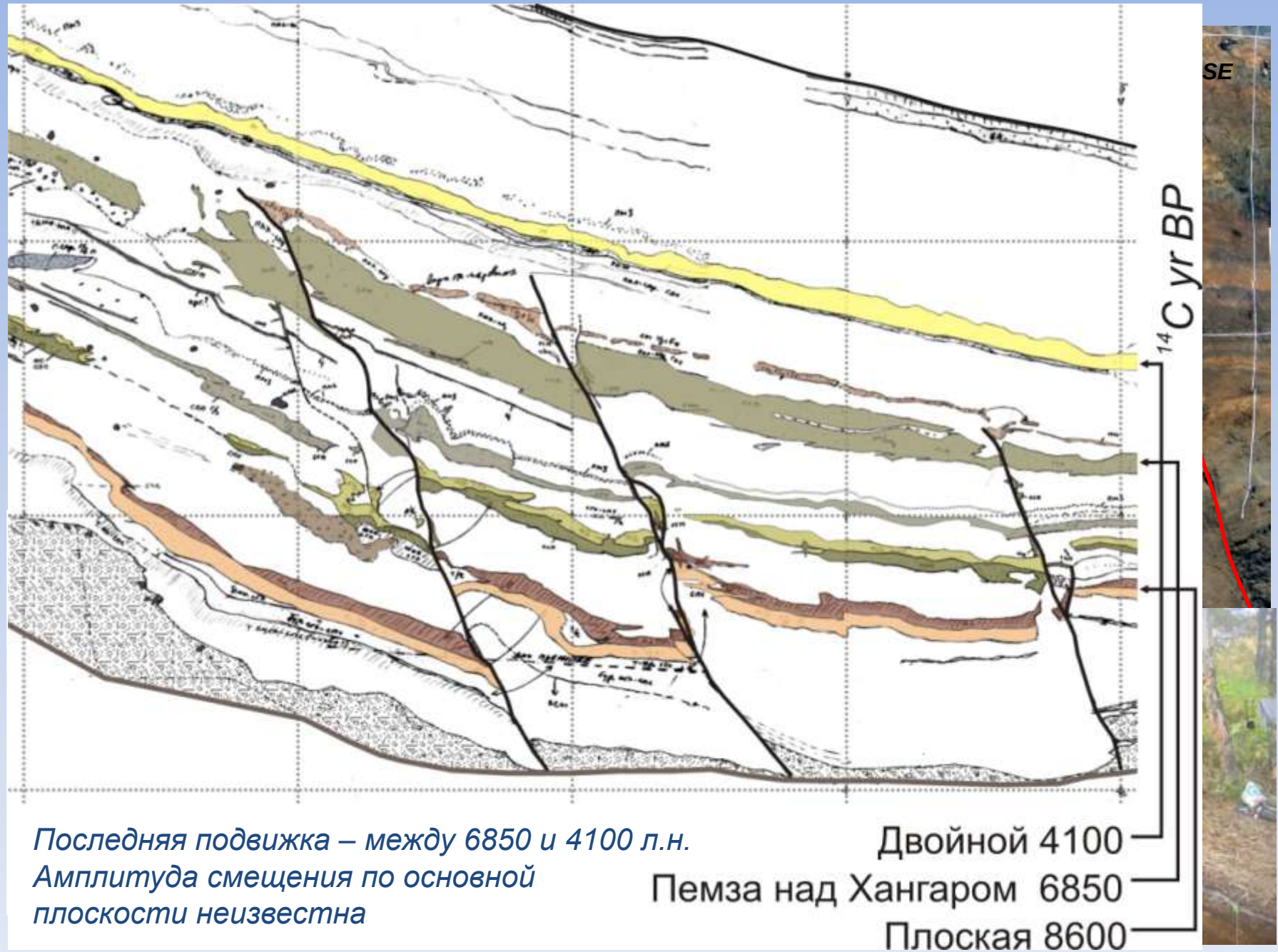
Возраст тefры (калиброванный,
средние взвешенные значения) –
по *Ponomareva et al., 2017*

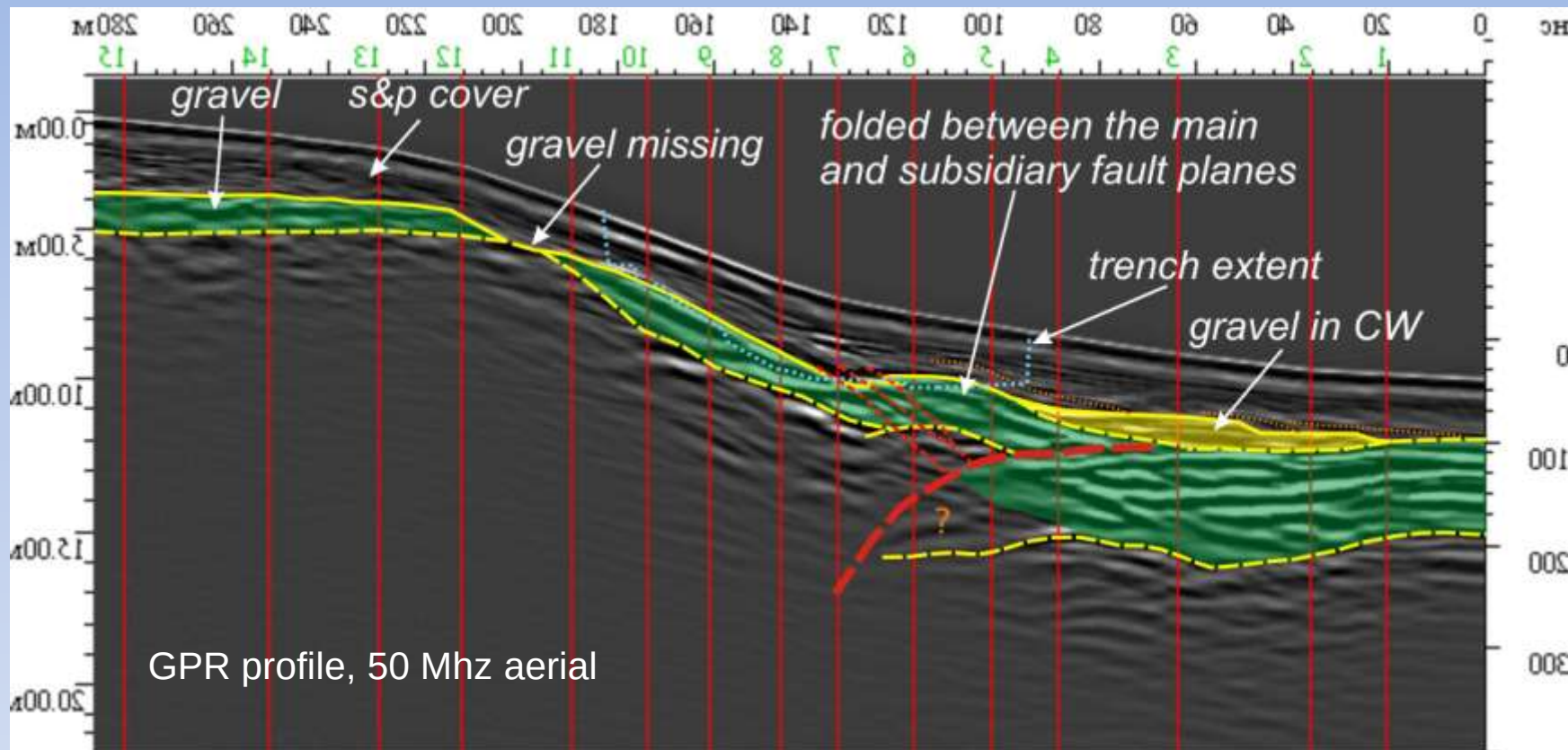
Подвижка 1: 9 тыс. л.н.

Подвижка 2: в интервале 4 -1.5 тыс. л.н.

Последняя подвижка ~ 5 м ➡ $M_{\max} \sim 7.5-8(?)$
Интервал повторяемости ~ 5-7 тыс. лет

Надвиговой разлом западного ограничения блока Камчатского п-ва

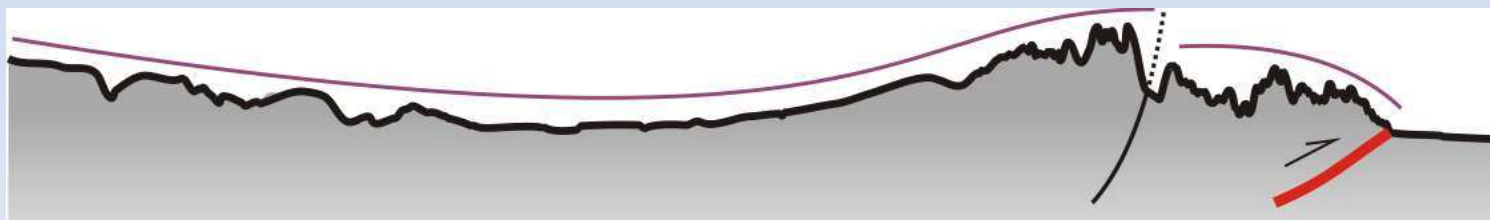




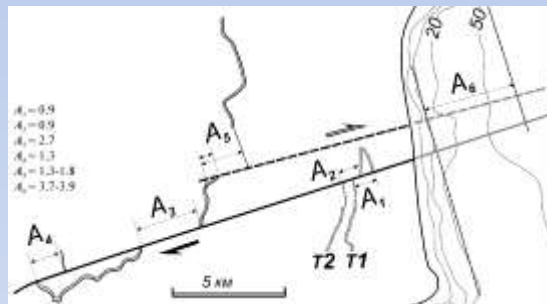
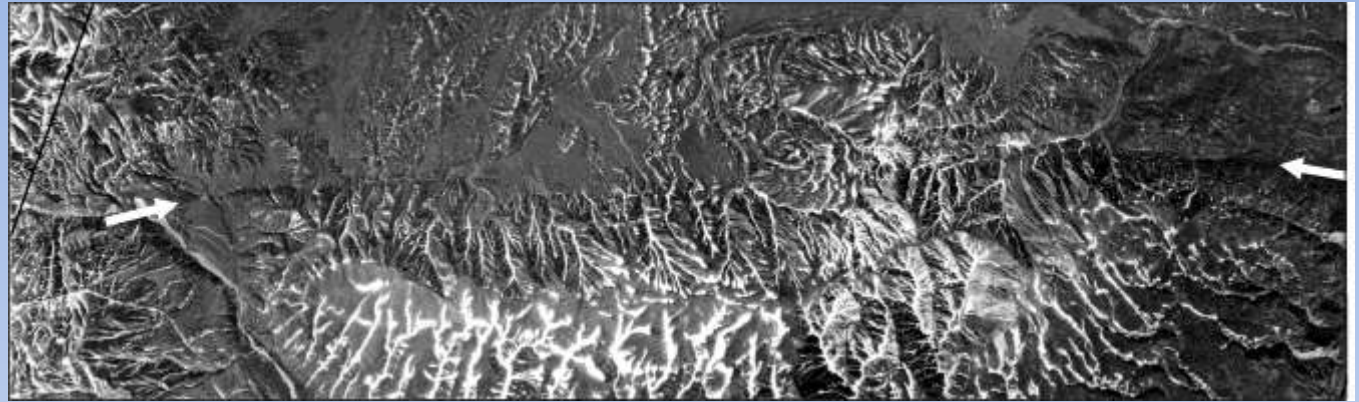
Кожурин, Пинегина, 2011

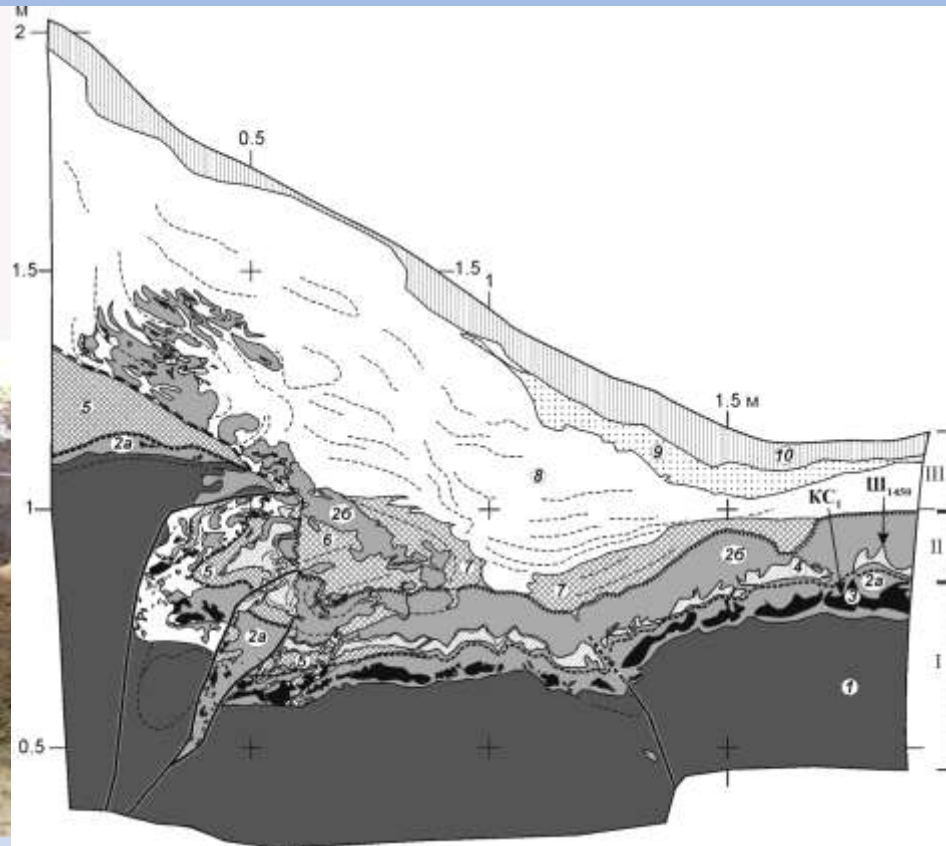
NW

SE



Правосторонний сдвиг в ЮВ части полуострова, скорость сдвига 18-20 мм в год





Кожурин и др., 2014

Подвижка 1: ~ 1350 л.н.

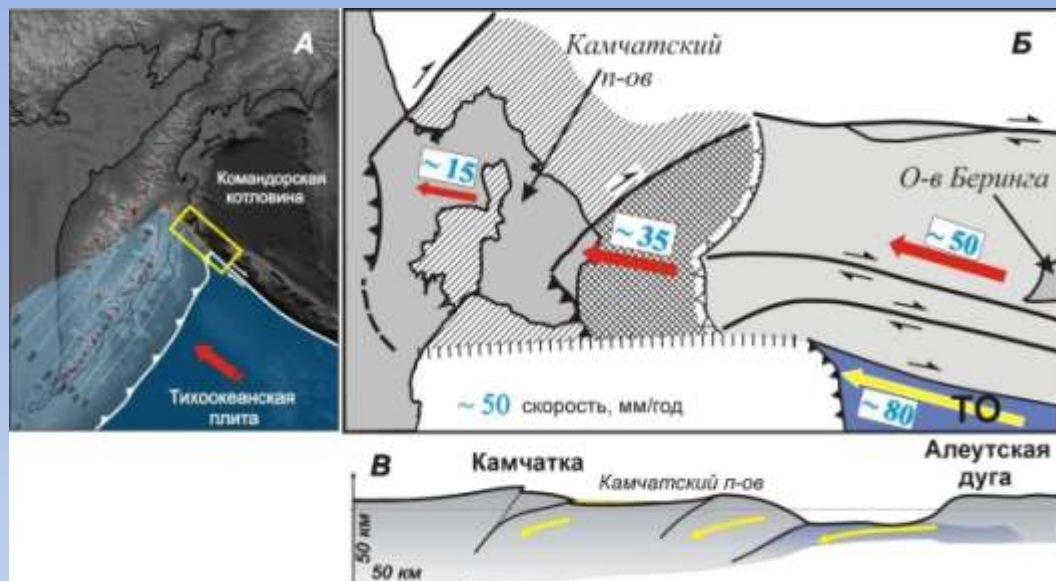
Подвижка 2: ~ 550 л.н.

Интервал повторяемости ~ 800 лет (??)

Амплитуда разовой сдвиговой подвижки
неизвестна

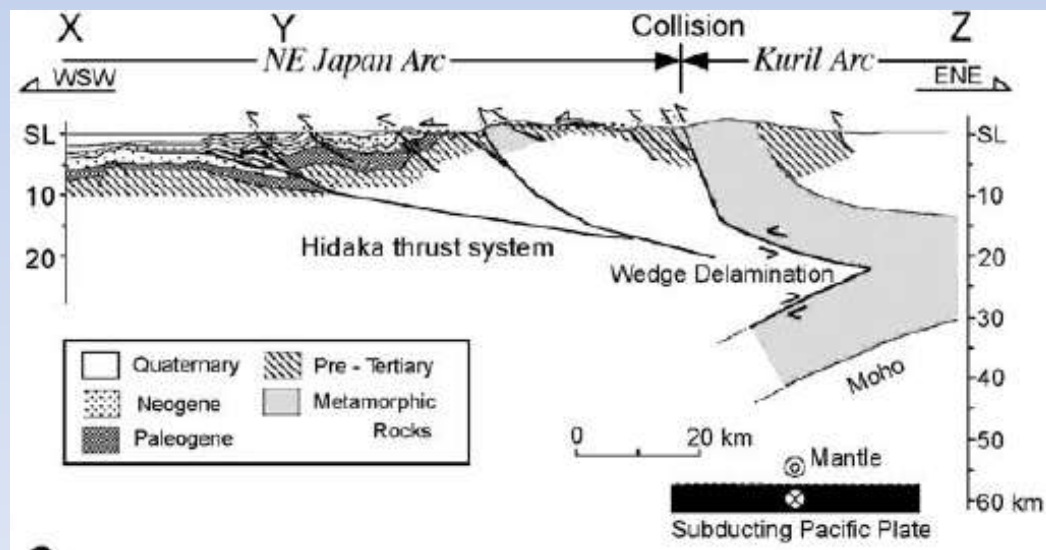
Разломы разной геодинамической природы различаются значениями максимальных магнитуд землетрясений, которые они могут генерировать - 6.5-6.8 для листрических сбросов и до 7.5 для коллизионных взбросо-сдвигов.

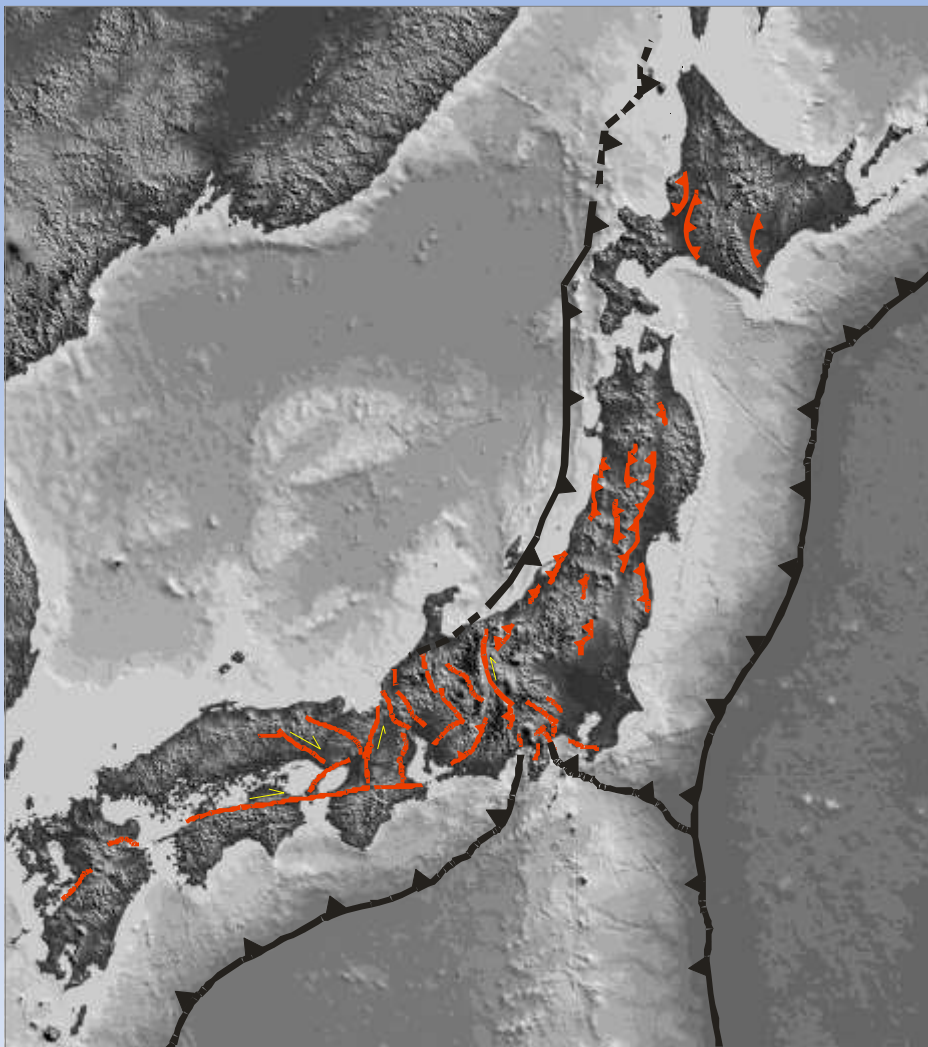
Интервалы повторяемости подвижек для разломов разной геодинамической природы примерно одни и те же - первые тысячи лет.



1. Поддвиг активного крыла (п-ва Камчатский в составе Командорского блока) под хр. Кумроч (почему он, собственно, и воздымается) – то же самое, что и в системе Изу-Бонины – Япония

2. Скорость движения Командорского блока на СЗ - ~ 60% от скорости движения ТО. Примерно 60% из этих 60% - тах скорость латерального сокращения п-ва Камчатский.





Японская островная дуга, ее сегмент над Тихоокеанской плитой

- активные меридиональные
взбросы с западным и восточным
падением плоскостей
- взбросо-надвиговая граница с
Японской котловиной

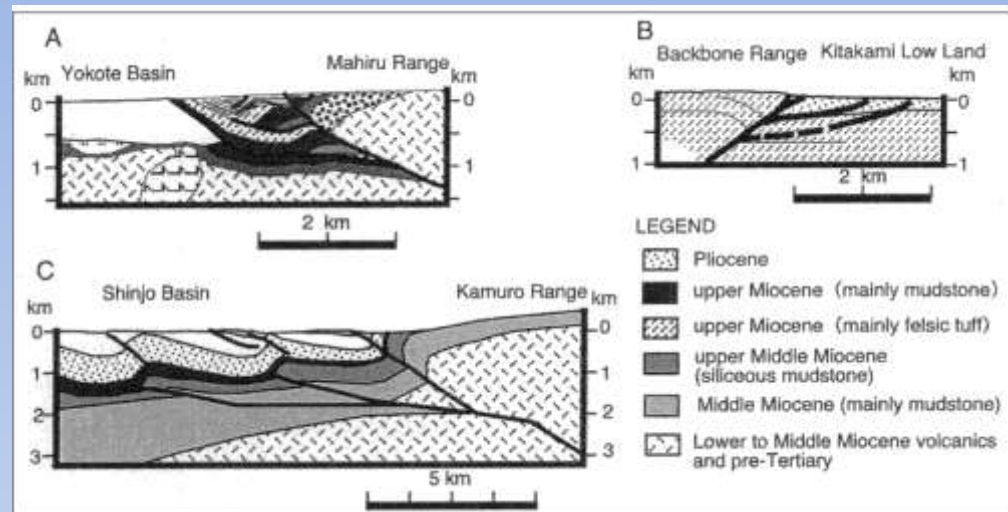
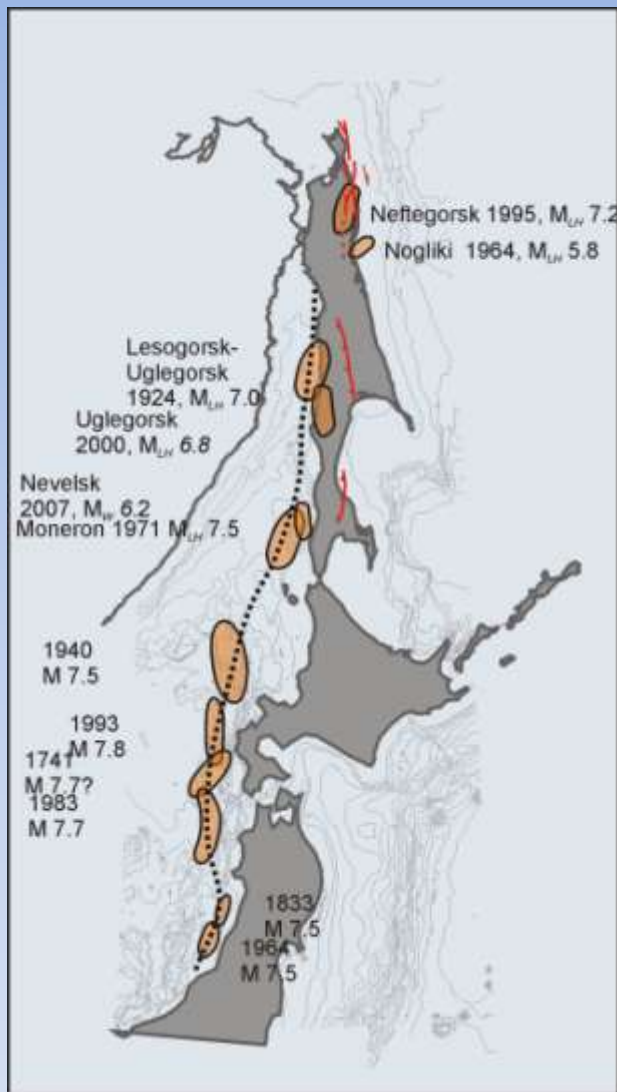


**поперечное дуге
сокращение земной коры**

Taira, 2001

Sato et al., 2002

Hashimoto & Jackson 1993



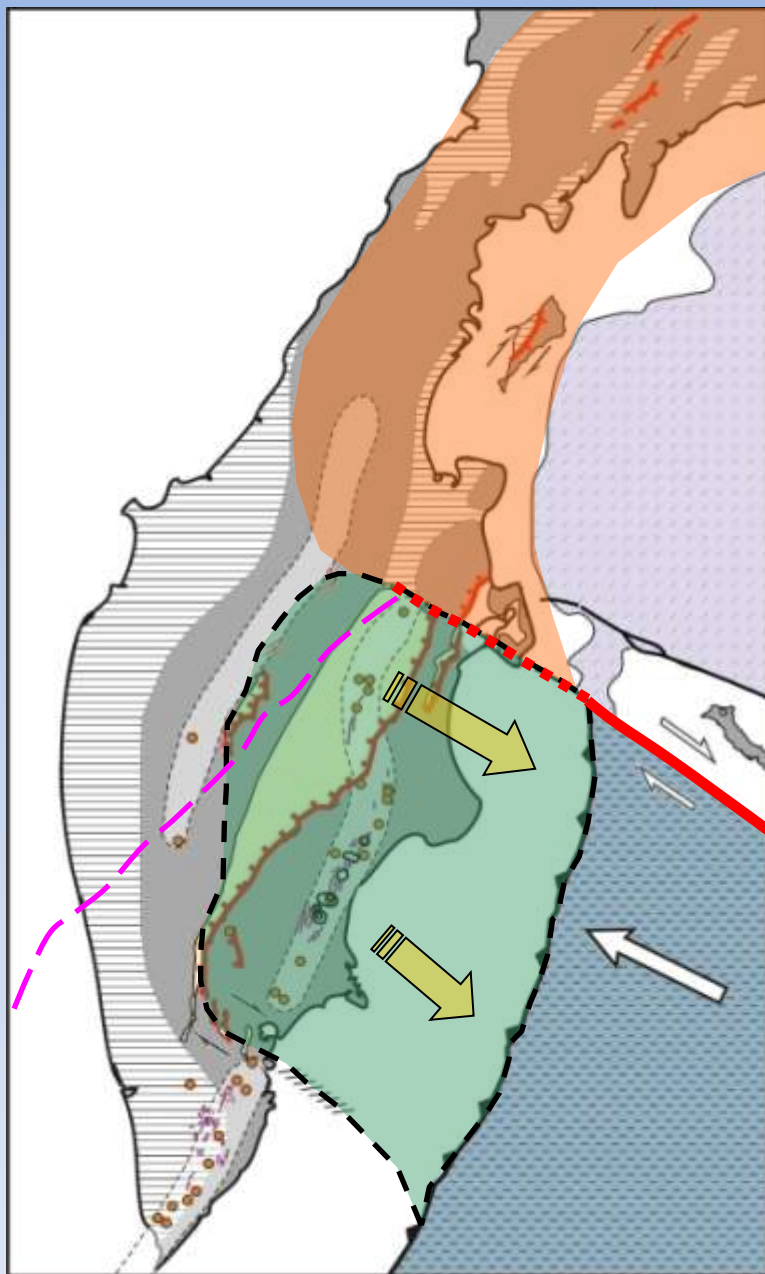
Sato et al 2002

Взбросовая активная разломная тектоника в северной части о-ва Хонсю

Надвиговые механизмы очагов сильных землетрясений вдоль западного края Японской дуги, падение плоскостей – под дугу

по Katsumata et al., 2004,

с дополнениями



Западное и северное
обрамление Командорской
котловины – поперечное
сокращение земной коры – результат
и проявление движения обрамлений
(включая Командорский блок)
Берингова моря в сторону Азии.

Центральная Камчатка –
растягивание земной коры в сторону
океана, скорее всего, вследствие
отступления погруженной части
Тихоокеанской плиты и желоба в
сторону океана.