

УДК 551.243

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ И СКЛАДЧАТО-БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА ГИМАЛАЕВ ГАРВАЛА (ИНДИЯ): РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ

© 2020 г. Е. А. Рогожин¹, *, Е. Ю. Соколова¹, S. N. Somala²,
Н. В. Андреева¹, М. С. Raghucharan²

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
ул.Б. Грузинская, д. 10, 123995, Москва, Россия

²Indian Institute of Technology (IIT),
Kandi, Sangareddy Telangana, 502285, Hyderabad, India

*e-mail: eurog@ifz.ru

Поступила в редакцию 10.06.2019 г.

После доработки 12.09.2019 г.

Принята к публикации 24.09.2019 г.

Проведено геолого-геофизическое изучение представительного сегмента Альпийско-Гималайского подвижного пояса – центральной зоны Гималаев Гарвала (Индия). Приведены результаты структурно-геологических исследований в совокупности с данными о глубинном строении, полученными геофизическими методами, сопоставлены скорости горизонтальных движений и положение гипоцентров сейсмических событий. Отмечено последовательное уменьшение современных скоростей поперечного сжатия по мере приближения к максимальным топографическим высотам геолого-геофизического профиля, заданного вкост Гималаев Гарвала. Показаны крупные зоны разломов, к которым приурочены очаги глубоких землетрясений.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, тектоника, Гималаи, Гарвал, глубинное строение, земная кора, разлом, шарьяж

DOI: 10.31857/S0016853X20010117

ВВЕДЕНИЕ

Представления о сейсмических брешах, или зонах сейсмического затишья, впервые разработаны С.А. Федотовым в 1965 г. для северо-западной сейсмоактивной континентальной окраины Тихого океана [5, 6]. На базе анализа закономерностей развития сейсмического цикла и выявления брешей была построена стратегия долго- и среднесрочного прогноза землетрясений на Курило-Камчатской островной дуге. Метод непрерывно применяется с 1965 г., совершенствуясь со временем. В настоящее время по этому методу прогнозируется ряд характеристик сейсмичности Курило-Камчатской дуги на следующий пятилетний период. Выделяются вероятные места подготовки следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ (сейсмические брешы), – к ним относятся участки, в которых таких землетрясений не было в течение последних 80 лет. Затем определяется глубинное строение сейсмических брешей и относительная опасность их активизаций, прогнозируются сейсмическая активность, магнитуды M сильнейших ожидаемых землетрясений и вероятности их возникновения.

Ранее этот метод применялся при исследовании участков сейсмического затишья в пределах отдельных сегментов Альпийско-Гималайского подвижного пояса [1]. В настоящей работе аналогичный подход распространяется на изучение горно-складчатой системы Гималаев, а именно – Гималаев Гарвала, для которого получены и обработаны данные о распределении гипоцентров землетрясений, палеосейсмо-геологические и геолого-геофизические данные [4].

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Структурно-морфологические и вещественные особенности района исследования

Горная страна Гималаев Гарвала (Гарвал или Гарвал Кумаон), административно относящаяся к индийскому штату Уттаракханд, занимает значительный сегмент ($\sim 77^\circ$ – 80° в.д.) в арке альпийского орогена Гималаев (рис. 1). Участок Гималайского Сейсмического Пояса, максимально концентрирующий сейсмическую активность, обусловленную, по мнению Molnar с соавт. [22, 23], Ni с соавт. [28], Kayal с соавт. [17], продолжаю-

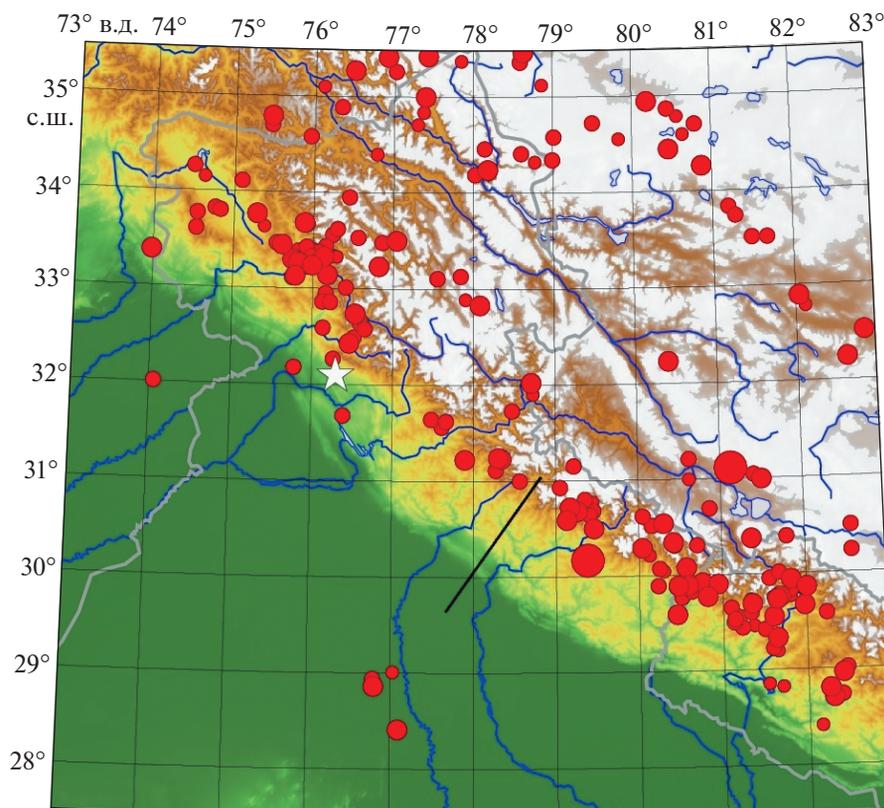


Рис. 1. Эпицентры 200 землетрясений с магнитудами $3 < m_b < 6$, зарегистрированных в области западных Гималаев на широте 31.00, долоте 78.00, радиусом 500 км в период с марта 1999 г. по апрель 2019 г. (по данным [45]). Радиусы меток пропорциональны соответствующим величинам m_b .

Показан (белая звезда): эпицентр сильнейшего землетрясения Кангра 1905 г. ($M = 7.7$), между меридианами 76.5° – 78.5° в.д. в Гималаях Гарвала отмечается зона сейсмического затишья в границах Центральной сейсмической брешы.

Показано (черная линия) схематичное положение профиля магнитотеллурических зондирований, данные которого использованы в исследовании.

Показано (цвет) высота местности над уровнем моря – до 1 тыс м (зеленый), до 3 тыс м (желтый), выше 3 тыс м (коричневый), выше 4 тыс м (белый).

щимся со времени начала эоценовой коллизии поддвигом Индиостанской плиты под Тибетское плато, определен, как Гарвалский Тектонический Коридор. За последние десятилетия в нем произошли два крупных землетрясения:

- Чамоли (1999 г., $m_b = 6.3$),
- Уттаркаши (1991 г., $m_b = 6.6$) (рис. 2).

Более крупных событий здесь не было с момента исторического Кумаонского землетрясения (1803 г., $m_b = 7.0$ – 8.0). Это позволяло рассматривать Гарвал–Кумаон как западный фланг сейсмической брешы в Центральных Гималаях – протяженного участка гряды ($\sim 77^\circ$ – 86° E), характеризующегося большим дефицитом сейсмических подвижек [10, 18].

Недавнее Непальское катастрофическое землетрясение Горкха ($M = 7.8$, 2015) [3, 31] сократило сейсмическую брешь с востока, но, по-видимому, незначительно уменьшило величину на-

копленного сейсмического напряжения в Гарвале, а, следовательно, и опасность возникновения здесь крупных землетрясений. Между меридианами 76.5° – 78.5° в.д. в Гималаях Гарвала отмечается локальная зона сейсмического затишья, где за последние 20 лет относительно редки землетрясения даже умеренной интенсивности ($m_b > 3$) (см. рис. 1). Государственные постоянно функционирующие и временные сейсмические сети Индии оперативно ведут контроль сейсмичности на территории Уттаракханда с начала 80-х годов прошлого века [17]. В те годы были начаты и геоэлектрические исследования региона, направленные на изучение глубинного распределения электропроводности как источника сведений о структурах тектоносферы, вещественном составе, термальном и флюидном режимах недр [7, 14, 15]. Структурно-тектонические работы в 1960–80 гг. обеспечили выполнение основного этапа детального изучения приповерхностного геологическо-

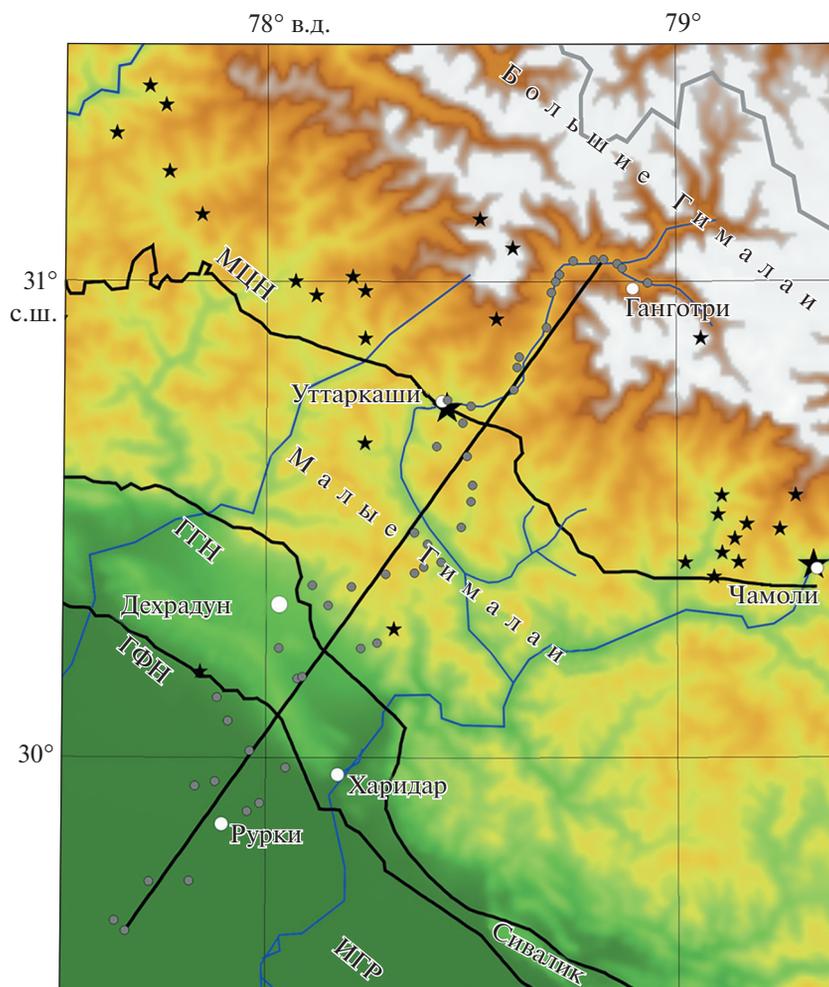


Рис. 2. Схематическая линия профиля магнитотеллурических зондирования Рурки-Ганготри (RG) и положение пунктов наблюдений (серые кружки), по [4] на фоне топографической карты и основных структурных линий Гималайского пояса надвигов в области Гималаев Гарвала (по [41], с изменениями и дополнениями). Обозначены: ГФН – Гималайский Фронтальный Надвиг, МВТ – Главный Граничный Надвиг, МЦН – Главный Центральный Надвиг, разделяющие, соответственно, ИГР – Индо-Гангскую равнину, Сивалик, Малые Гималаи и Большие Гималаи. Показаны: эпицентры землетрясений Гарвалского тектонического коридора с $m_b > 3$ (по [46]) (маленькие звезды) и наиболее крупные землетрясения последних лет – Чамоли, ($m_b = 6.3$, 1999 г.) и Уттаркаши, ($m_b = 6.8$, 1991 г.) (большие звезды). Показана (цвет) высота местности над уровнем моря: до 1 тыс м (зеленый), до 3 тыс м (желтый), выше 3 тыс м (коричневый), выше 4 тыс м (белый).

го строения региона [13, 37]. Эти геолого-геофизические сведения дополняли результаты применения сейсмологических методов, опирающихся на данные региональной сети сейсмического мониторинга, и использовались для обоснования построений региональных геодинамических и сеймотектонических моделей [8, 12].

СТРОЕНИЕ ГИМАЛАЕВ ГАРВАЛА И КУМАОНА

В настоящее время в Гималайском поясе взбросо-надвигов (Надвиговый Пояс Гималаев) в

области, поглощающей наибольшую долю коровой деформации, обусловленной континентальной коллизией [23, 37], выделяются четыре наиболее крупные зоны разрывных структур (от древней на севере к более молодым на юге):

- Южно-Тибетский разрыв, разделяющий Тибетское плато и зону Больших Гималаев;
- две ветви Главного Центрального Надвига (ГЦН) между Большими Гималаями и Малыми Гималаями – зона распределенного взбросо-надвига, ограниченная линиями первой ветви, Главного Центрального Надвига – ГЦН1 (надвиг Ман-

суари) и его второй ветви – ГЦН2 (надвиг Варкри-та) – в Гарвале, имеющая ширину 20–30 км;

- Главный Граничный Надвиг (ГГН), проходящий у подножья Малых Гималаев;

- Гималайский Фронтальный Надвиг (ГФН), отделяющий холмы, сложенные плейстоценовыми молассовыми отложениями формации Сивалика, от Индо-Гангской равнины.

Эти структурно-тектонические линии, протягивающиеся субпараллельно вдоль всей дуги Гималаев, на Гарвалском участке ориентированы в направлении ~130° ЮВ (см. рис. 2). Близ поверхности взбросы характеризуются крутым падением на северо-восток или северо-северо-восток, а далее с глубиной, как принято полагать, выполаживаются и корнями уходят в плоскость срыва индийской литосферы (детачмента) – Главный Гималайский взброс, впервые выделенный по сейсмологическим данным в [36].

Знания о глубинном строении этих тектонических структур, являющихся ключевыми элементами всей складчато-надвиговой коллизионной системы Гималаев, крайне важны для понимания ее геодинамики. Знания, полученные первоначально на основе анализа информации о положении гипоцентров, механизмах очагов землетрясений [23] и гравиметрических данных [18, 23, 28, 30, 36], в настоящее время продолжают существенно уточняться, в первую очередь, по материалам наблюдений сети современных широкополосных сейсмических станций [11, 12, 27, 29, 33, 35]. Сейсмологические и сейсмические данные по ряду сегментов Гималайской дуги дают представление о погружении под углом в первые градусы поверхности Главного надвига Гималаев от Сивалика до зоны перехода Малых Гималаев к Большим Гималаям, где на среднекоровых глубинах (15–20 км) начинается участок ее более крутого (до 20°) падения, далее выполаживающийся в направлении Тибетского плато. Существование подобной рамповой структуры в поверхности детачмента для Гарвала ранее намечалось и геолого-структурными построениями [37].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение глубинного строения Гималаев Гарвала проводилось методом магнитотеллурических зондирований (МТЗ) с привлечением материалов о структурно-тектоническом приповерхностном строении.

Области активного орогенеза отличаются яркими аномалиями электропроводности [44], обусловленными структурно-вещественными, а также и реологическими особенностями литосферы подобных регионов. Изучение Гарвала с помощью современных методик и технологий магнитотеллурического зондирования было начато

позднее, чем в Восточных и Центральных Гималаях, однако, полученные геоэлектрические модели земной коры достаточного разрешения уже используются для верификации данных других геофизических методов при построении тектонических и геодинамических моделей, а также для получения обоснованной оценки сейсмической угрозы [11, 12, 32, 33].

Профиль широкополосных МТЗ по линии Рурки-Ганготри Индийского технологического института Рурки (г. Рурки, Индия), протянувшийся вкоструктур орогена от Индо-Гангской равнины до высокогорных истоков Ганга [15] (см. рис. 2), был дополнен новыми зондированиями и переобработан в рамках сотрудничества с российскими учеными [4]. В процессе 2D инверсии магнито-теллурических данных был построен разрез глубинной электропроводности Гарвала, который выявил ее основные квазидвумерные черты и позволил представить обоснованный с позиций геоэлектрики и сейсмологии вариант проведения глубинных тектонических линий Гималайского пояса надвигов. В разрезе была уточнена локализация ассоциированного с рампом Главного Гималайского Надвига среднекорового проводника – типичной особенностью Гималайского пояса надвигов, обнаруживаемой практически всеми секущими его профилями магнитотеллурических зондирований [44], а также идентифицированы зоны сейсмогенерации Гарвальского тектонического коридора [4].

В последние годы в области, отвечающей центральному участку профиля Рурки-Ганготри, были проведены полевые работы по методикам, применяемым при детальном структурно-тектонических исследованиях в складчатых системах подвижных горных поясов [2]. Их результаты позволили составить структурно-геологический разрез вдоль линии профиля МТЗ (рис. 3), отразивший основные складчатые и разломно-разрывные структуры, наблюдаемые на поверхности. Данные о глубинном геоэлектрическом строении земной коры этого сегмента Гималаев Гарвала, полученные магнитотеллурическим методом, были сопоставлены с выделенными приповерхностными тектоническими структурами, что позволило обнаружить и проанализировать их взаимосвязи, и, как следствие, предложить новый вариант проведения линий тектонических разделов в верхней части разреза.

Характер геоэлектрического разреза позволяет подразделить его на три сегмента (блока) (см. рис. 3).

В первом фрагменте разреза от Фронтального Надвига Гималаев до Главного Граничного Надвига, наиболее проводящем и отвечающем предгорному прогибу синклинали формы, выполненному молассовой формацией Сивалик, поверхность кристаллического фундамента или,

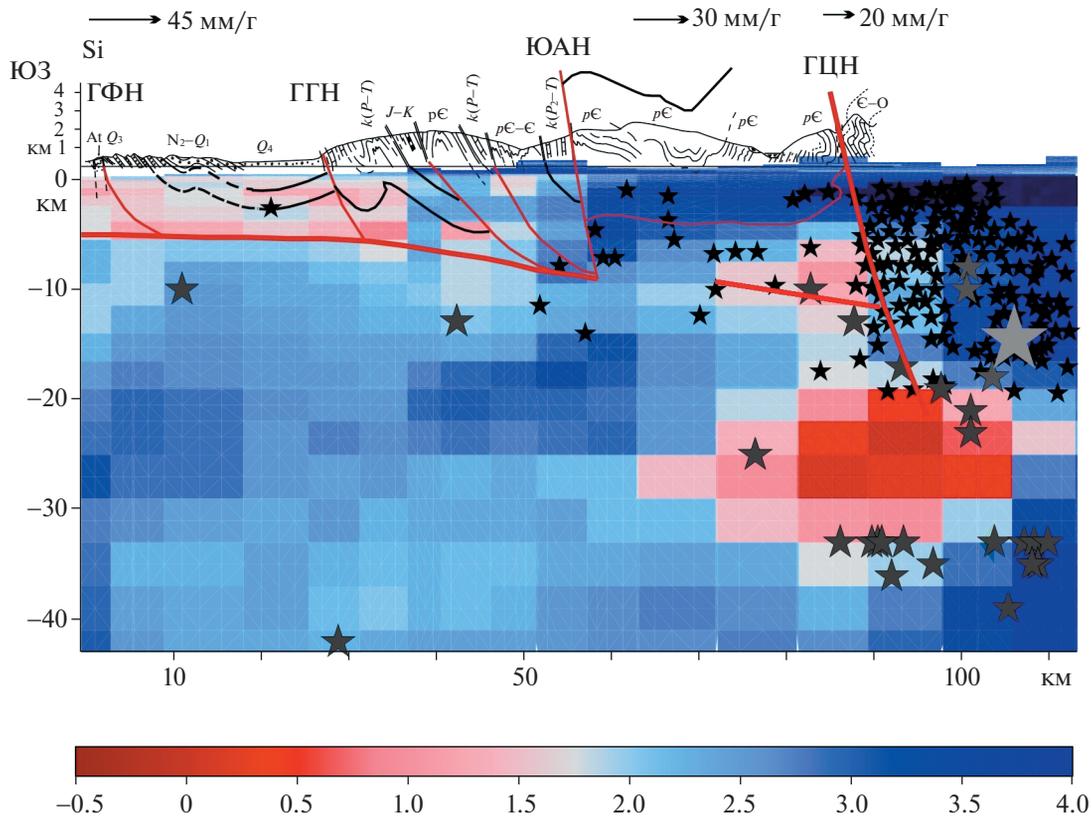


Рис. 3. Центральный фрагмент геоэлектрического разреза по линии Рурки–Ганготри в соответствии с приведенной цветовой шкалой удельного электрического сопротивления в $\lg \text{ Ом} \cdot \text{ м}$ (по [4]), совмещенный с геологическим разрезом для зон Малых Гималаев и Сивалика.

На разрез сопротивлений из полосы 70 км вокруг профиля спроецированы гипоцентры землетрясений $m_b > 3$ (по данным [46]) (серые звездочки), локальная сейсмичность (по [18, 19, 40]) (черные звездочки), наиболее крупное местное землетрясение последних десятилетий – Утгаркаши – $m_b = 6.8$, 1991 г. (большая звезда).

Над частями разреза помещены соответствующие оценки скоростей (мм/г.) современных горизонтальных движений, полученных методом GPS измерений (по [42]).

Показаны зоны разломов: Главного Центрального Надвига (ГЦН), Южно-Алморского Надвига (ЮАН), Главного Граничного (ГГН), Фронтального Надвига Гималаев (ГФН). Приведен возраст основных стратиграфических комплексов и положение моласс формации Сивалик (Si).

возможно, поверхность срыва (детachment), может быть соотнесена с субгоризонтально залегающей в диапазоне глубин около 5–6 км границей резкого (на порядок) повышения удельного электрического сопротивления (см. рис. 3).

Второй сегмент, следующий к северу от Главного Граничного Надвига, характеризуется умеренно-повышенными, по сравнению с предшествующим участком, значениями электросопротивлений. При этом контрастная граница с более изолирующим основанием здесь, во фронтальной части Низких Гималаев, опускается до глубины около 15 км.

В приповерхностной части коры в области Главного Граничного Надвига залегает узкая зона круто погружающихся к северу слоев третичных отложений – известково-глинистых сланцев, и кварцитов. Севернее этого участка располагается крупная складчато-разрывная антиклинорная

структура, в ядре которой обнажаются кристаллические сланцы докембрия (формация Джаунсар), на крыльях обнажены слабо метаморфизованные слои глинисто-известнякового состава, пермско–триасового и юрско–мелового возраста. Далее на север-северо-восток по крутому взбросу южной вергентности на толщу пермско-триасовых сланцев с прослоями известняков вновь надвинуты кристаллические сланцы формации Джаунсар кембрийского и докембрийского возраста. Северо-восточнее они вновь перекрываются взброшенными с северо-востока породами сланцево-известнякового состава пермско-триасового возраста. Таким образом, юго-юго-восточная часть Малых Гималаев Гарвала имеет явную складчато-взбросовую структуру с крутым погружением основных взбросовых нарушений к северо-северо-востоку.

С северо-северо-востока эта складчато-блоковая зона подвижной системы Малых Гималаев ограничивается крутопадающим в ССВ направлении разломом, имеющим название Южно-Алморский взброс [16].

Третий сегмент соответствует Кумаонской части Малых Гималаев Гарвала. Верхние 8–12 км мощности этого блока отличаются как зона повышенных значений удельного сопротивления, а глубже (10–20 км) располагается слой со средними значениями этого параметра. Такие параметры сохраняются на всей ширине этого крупного (около 30 км) блока коры. На поверхности наблюдается синклиновая структура, осложненная более мелкими слабо сжатыми складками в метаморфизованных толщах – кристаллических и шиферных сланцах, филлитах формаций Чандпур и Нагхат докембрийского возраста. Эта широкая синформа представляет собой тело тектонического покрова Гарвала (покрова Кроль), переброшенное в зону Малых Гималаев с севера [13, 41].

Покровная структура с севера обрамляется южной ветвью Главного Центрального Надвига (см. рис. 2, рис. 3), имеющей на этом отрезке собственное название – разлом Сринагар, которая выглядит здесь, как очень крутое тектоническое нарушение, падающее в северных румбах. В южном крыле его располагается опрокинутая к югу синклиналь, сложенная докембрийскими кристаллическими породами формации Чандпур, а в северном – опрокинутая к югу антиклиналь, образованная кристаллическими сланцами формации Раутгара и известняками позднедокембрийского–кембрий–ордовикского возраста.

В верхней части коры (до глубины 5 км) данная пограничная зона подстилается слоем с высокими значениями сопротивления, глубже (5–30 км) маркируется узкой областью с пониженными и средними значениями сопротивления. При этом в северном направлении рассматриваемая область относительно повышенных значений электропроводности с увеличением глубины выполаживается наподобие листовидного взброса и приобретает близгоризонтальное залегание.

На разрез электросопротивлений из полосы 70 км вокруг профиля спроецированы гипоцентры землетрясений (см. рис. 3) $m_b > 3$ [46] и локальная сейсмичность [19, 40]. Наблюдается концентрация гипоцентров в зонах некоторых разломов:

- Гималайского Фронтального Надвига на глубинах 8–10 и до 15 км;
- Южно-Алморского Надвига на глубинах от 5 до 18 км;
- южной ветви Главного Центрального Надвига (или разлома Сринагар) на глубинах от 5 до 45 км.

Приведенные данные свидетельствуют о современной сейсмической активности не только

пологого срыва в основании осадочного чехла, но и крутопадающих зон разломов взбросовой морфологии.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Представленная нами геоэлектрическая модель разреза Гарвалского тектонического коридора идентифицирует сейсмогенерирующие зоны – изолирующие (жесткие) блоки в зоне Главного Центрального Надвига над и под изометричной областью высокой электропроводности (наиболее вероятно – областью ослабления и флюидизации земной коры) в зоне рампа Главного Гималайского Надвига. Подобное распределение электропроводности объясняет явление бимодального глубинного распределения сейсмичности в сейсмоактивном поясе Гималаев [24, 17].

Проведенные исследования скоростей современных горизонтальных движений методом GPS измерений [42] показывают снижение этих значений в направлении с юга на север от 45 мм/г. под зоной Сивалика, до 30 мм/г в районе тектонического покрова Кроль и до 20 мм/г к северу от разлома Сринагар в зоне Главного Центрального Надвига (см. рис. 3).

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ЗАТИШЬЕ

На западе сейсмоактивного пояса Гималаев Индии наблюдается область сейсмического затишья. Здесь вдоль Фронтального Надвига Гималаев в историческое время произошли сильнейшие землетрясения:

- Кангра 1905 г. ($M = 7.7$),
- Бихар-Непал 1934 г. ($M = 8.1$) [32, 20].

В то же время, между очаговыми зонами этих сейсмических событий остались протяженные отрезки зоны разлома, где такие сильные толчки неизвестны. Эти участки были объединены К.Н. Кхаттри [18] в центральную сейсмическую брешь протяженностью более 200 км с прогнозным сейсмическим потенциалом $M = 8.0$. Исходя из размеров области, в которой отсутствуют эпицентры сильных сейсмических толчков за последние 20 лет, ее протяженность можно оценить в 250–300 км (см. рис. 1). После произошедшего в 2015 г. сильнейшего землетрясения Горкха ($M = 7.8$) сейсмологический и геолого-геофизический мониторинг этой зоны представляется актуальным.

Палеосейсмо-геологические исследования центрального сектора Западных Гималаев

Проведенные палеосейсмо-геологические работы с применением метода тренчинга на нескольких участках этой бреши длиной около 250 км позволили выявить следы ряда сильней-

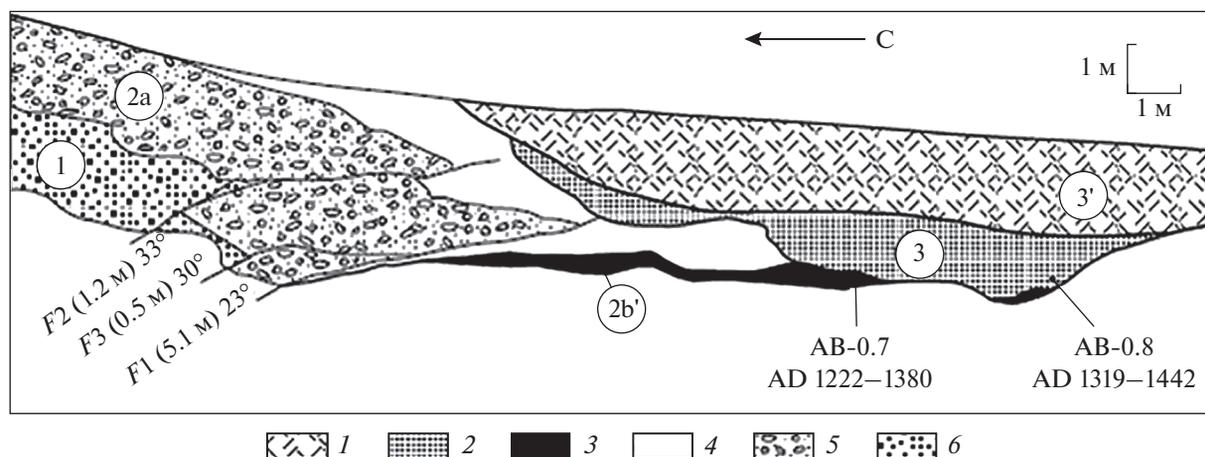


Рис. 4. Детальная зарисовка южной части канавы в районе Рампур Данга в Западных Гималаях вкострости простираения Фронтального взброса Гималаев (по данным [1], с изменениями и дополнениями).

Показаны ископаемые сейсмические разрывы с углами падения и амплитудой импульсных взбросовых смещений, метры.

1 – горизонт 3' (коллювий): тонко- и среднезернистые глинистые отложения, рыхлые осадки блоковой структуры и хаотической текстуры; 2 – горизонт 3 (эоловый (?)): пески средней грубости с редкими гальками, слоистые, иногда косослоистые; 3 – горизонт 2b': темно-серый богатый органикой глинистый ил с прослоями среднезернистого песка и обильными обломками керамики; 4 – рыхлые осадки блочной структуры, редкие керамические черепки, массивные глинистые илы с пакетами среднезернистых песков; 5 – горизонт 2a: флювиальные пески с галькой, грубообломочным гравием (обломки хорошо окатаны и полуокатаны), переслаивающиеся с пакетами песков и гальки среднего размера; 6 – горизонт 1: сильно раздробленные и нарушенные разрывами песчаники основания (формация Сивалик), горизонт 2b': данные радиоуглеродного датирования богатого органикой глинистого ила

ших событий, согласно результатам радиоуглеродного датирования, происходивших на участке фронта Гималаев в периоды между 261 и 775 г. и между 1222 и 1622 г. [1, 20].

Сейсмогенное смещение по зоне Фронтального Надвига, зафиксированное в траншее и соответствующее второму сейсмическому событию, составило более 5 м (рис. 4), что свидетельствует о магнитуде породившего его землетрясения около 8.0. Вероятно, эти дислокации соответствуют по времени землетрясению, произошедшему в Гималаях в 1505 г. ($M = 8.2$) [20]. По результатам исследований можно заключить, что период повторения землетрясений с магнитудой, близкой к $M_{\text{макс}}$, в передовой зоне Западных Гималаев составляет примерно раз в тысячу лет, а сильных землетрясений с меньшей магнитудой – раз в 500 лет [38].

Позже в Предгималаях в зоне Фронтального Надвига были проведены палеосейсмогеологические исследования [21, 34]. По результатам этих недавних работ, выполненных методом тренчинга в центральной индийской части Предгималаев, описаны множественные палеосейсморазрывы, датированные периодами 467–570, 1294–1587 и 1750–1932 лет назад [21]. По приведенным данным исследований, мы можем утверждать, что в периоды около 500 и 1500 лет назад произошли такие сильнейшие сейсмические события.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные нами исследования по изучению глубинного строения Малых Гималаев Гарвала показали, что кроме полого наклонного к северо-северо-востоку срыва, который, безусловно, подтверждается под передовым прогибом Сивалика и внешней зоной Малых Гималаев, существуют круто наклонные к северу разрывные нарушения (ГФН, ГГН, разломы Южно-Алморский, Сринагар), разделяющие верхние горизонты коры на крупные блоки с разными литолого-структурными характеристиками и, как следствие, различной электропроводностью. Распределение гипоцентров фоновых землетрясений, зарегистрированных в полосе профиля (см. рис.3), хорошо увязывается с положением крутопадающих тектонических нарушений и аномалий электропроводности.

Комплексные геолого-геофизические исследования по профилю, пересекающему предгорный прогиб и зону Малых Гималаев в секторе Гарвал, свидетельствуют о невозможности объяснить покровно-складчатую структуру этой зоны исключительно процессом альпийского шарьяжеобразования, как это представляется в ряде фундаментальных работ прошлого [13]. В последние годы также созданы разрезы земной коры с использованием результатов сейсмического профилирования и моделирования на основе геофизических данных, на которых Гималаи подстилаются листрическими системами полого

погружающихся к северу систем надвигов, объединяющихся на глубинах 10–15 км в единый срыв осадочного чехла с кристаллического фундамента [12, 25, 26]. На основании проведенной нами интерпретации геоэлектрического разреза с опорой на материалы геолого-структурного изучения можно утверждать, что этот пологий единый срыв в зоне Главного Центрального Надвига Гималаев нарушен уступом с амплитудой вертикального смещения около 10 км, к которому приурочено облако гипоцентров землетрясений на глубинах от 5 до 45 км. Вовлечение в формирование складчато-разломной структуры Малых Гималаев, наряду с юрско-меловыми осадочными толщами, древних палеозойских и докембрийских кристаллических пород, слагающих конформные с молодыми мезозойскими толщами складчато-блоковые комплексы позволяет интерпретировать зону передовой антиклинали как деформации альпийского этапа. В то же время, останец тектонического покрова в северо-северо-восточной части Малых Гималаев, образованный докембрийскими кристаллическими толщами, вероятнее всего, является структурой доальпийского возраста, надвинутой из области Больших Гималаев в позднем палеозое–раннем мезозое (пермь–триас) и приобретшим синформную морфологию в новейшее время. О его древнем возрасте говорит отсутствие мезозойских отложений в зоне тектонического покрова. Таким образом, шарьяжи могут иметь здесь позднегерцинский возраст.

Существенное снижение скорости современных горизонтальных движений земной поверхности в направлении от Индостанской плиты через Гималаи к Тибету свидетельствует о наличии напряжений в земной коре в подвижной системе, что может быть причиной их накопления в зонах активных разломов. Поэтому область сейсмического затишья в Гималаях Гарвала в недалеком будущем может породить сильнейшее землетрясение [32], особенно с учетом сейсмической активизации в соседнем восточном секторе Гималаев Непала в 2015 г. На возможность генерировать такие события указывают результаты проведенных в Гарвале в последние годы палеосейсмо-геологических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен комплексный анализ результатов геолого-структурных и магнитотеллурических исследований вдоль профиля, секущего Гималайский сейсмический пояс в области его сейсмической брешы, — на Гарвалском сегменте. В результате была составлена структурно-вещественная модель разреза Малых Гималаев Гарвала, складчато-блоковая конструкция которой, представляя альтернативу традиционными плейт-тек-

тоническими представлениям, строящимся на существовании единого пологого срыва чехла с фундамента, погружающегося в северном направлении и не нарушенного крутыми тектоническими разломами, хорошо увязывается с региональными геодинамическими и сейсмологическими данными. Выявленные особенности глубинного строения изучаемой области позволяют оценить основные сейсмогенерирующие структуры и опасность их активизации в недалеком будущем. Аналогичные модели применимы и для других складчатых подвижных систем таких, как Большой Кавказ и Тянь-Шань.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Департамента науки и технологии правительства Индии, грант 18-55-45010IND_a, проект DST no. INT/RUS/RFBR/P-335.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Парвез И.А. Палеосейсмогеологические исследования в области “сейсмической брешы” на северо-западном Кавказе в сравнении с регионом Западных Гималаев // Вопросы инженерн. Сейсмологии. 2009. Т. 36. № 4. С. 5–12.
2. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсюченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении // Геотектоника. 2015. № 2. С. 36–49.
3. Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Шень То. Тектоническая позиция, геологические и сейсмические проявления землетрясения Горкха 25 апреля 2015 г. в Непале // Геотектоника. 2016. № 5. С. 82–94.
4. Соколова Е.Ю., Израиль М., Гупта П., Кошурников А.В., Смирнов М.Ю., Череватова М.В. Коровая электропроводность зоны индийской континентальной субдукции: новые материалы по профилю в Гарвалских Гималаях // Физика Земли. 2016. № 2. С. 127–147.
5. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
6. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
7. Arora B.R., Mahashabde M.V. A transverse conductive structure in the northwest Himalaya // PEPI. 1987. Vol. 45. P. 119–127.
8. Arora B.R., Unsworth M.J., Rawat G. Deep resistivity structure of the northwest Indian Himalaya and its tectonic implications // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34. L04307. P. 1–4.
<https://doi.org/10.1029/2006GL029165>
9. Ashish P.A., Rai S.S., Gupta S. Seismological evidence for shallow crustal melt beneath the Garhwal High Himalaya, India: implications for the Himalayan channel

- flow // *Geophys. J. Int.* 2009. Vol. 177. № 3. P. 1111–1120.
10. *Bilham R., Gaur V.K., Molnar P.* Himalayan Seismic Hazard // *Science*. 2001. Vol. 293. P. 1442–1444.
 11. *Caldwell W.B., Klemperer S.L., Rai S.S., Lawrence J.F.* Partial melt in the upper-middle crust of the northwest Himalaya revealed by Rayleigh wave dispersion // *Tectonophysics*. 2009. 477. P. 58–65.
 12. *Caldwell W.B., Klemperer S.L., Lawrence J.F., Rai S.S.* Characterizing the main Himalayan Thrust in the Garhwal Himalaya, India with receiver function CCP stacking // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2013. Vol. 367. P. 15–27.
 13. *Gansser A.* Geology of the Himalayas. London, N.Y., Sydney: Intersci. Publishers, 1964. 289 p.
 14. *Gupta G., Gokarn S.G., Singh B.P.* Thickness of the Siwalik Sediments in the Mohand-Ramnagar region using magnetotelluric studies // *Phys. Earth and Planet. Interiors*. 1994. Vol. 83. P. 217–224.
 15. *Israil M., Tyagi D.K., Gupta P.K., Sri N.* Magnetotelluric investigations for imaging electrical structure of Garhwal Himalayan corridor, Uttarakhand, India // *J. Earth Syst. Sci.* 2008. Vol. 117. № 3. P. 189–200.
 16. *Jain M.S.* Geotechniques in the water resource development of the Kumaun Himalaya // *Himalayan Geology*. 1975. Vol. 5. P. 261–279.
 17. *Kayal J.R.* Microearthquake seismology and seismotectonics of South Asia. New Delhi: Capital Publ. Comp., 2008. 503 p.
 18. *Khattri K.N.* Great EQs, seismicity gaps and potential for EQ disaster along the Himalaya plate boundary // *Tectonophysics*. 1987. Vol. 138. P. 79–92.
 19. *Khattri K.N.* Local seismicity investigations in the Garhwal-Kumaon Himalaya // *Memoir. Geol. Soc. India*. 1992. Vol. 23. P. 45–66.
 20. *Kumar S., Wesnousky S., Rockwell T., Briggs R.W., Thakur V.C., Jayangodaperumal R.* Paleoseismic evidence of great surface rupture earthquakes along the Indian Himalaya // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. B 03304. <https://doi.org/10.1029/2004JB003309>
 21. *Kusala R., Revathy M.P., Rajendran C.P.* Seismotectonic perspectives on the Himalayan arc and contiguous areas: Inferences from past and recent earthquakes // *Earth Sci. Rev.* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.08.003>
 22. *Molnar P., Tapponnier P.* Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision // *Science*. 1975. Vol. 189. P. 419–426.
 23. *Molnar P.* A review of the seismicity and the rate of active underthrusting and deformation at the Himalaya // *J. Himalayan Geol.* 1990. № 1(2). P. 131–154.
 24. *Monsalve G., Sheehan A., Schulte-Pelkum V., Rajaure S., Pandey M.R., Wu F.* Seismicity and one dimensional velocity structure of the Himalayan collision zone: Earthquakes in the crust and upper mantle // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. B10301.
 25. *Morell K.D., Sandiford M., Rajendran C.P., Rajendran K., Alimanovic I. A., Fink D., Sanwal J.* Geomorphology reveals active décollement geometry in the central Himalayan seismic gap // *Lithosphere*. 2015. Vol. 7. № 3. <https://doi.org/10.1130/L407.1>
 26. *Mukhopadhyay S., Sharma J.* Crustal scale detachment in the Himalayas: a reappraisal // *Geophys. J. Int.* 2010. Vol. 183. P. 850–860.
 27. *Nabelek J., Hetenyi G., Vergne J., Sapkota S., Kafle B., Jiang M., Su H., Chen J., Huang B.* The Hi-CLIMB Team. Underplating in the Himalaya–Tibet collision zone revealed by the Hi-CLIMB experiment // *Science*. 2009. Vol. 325. P. 1371–1374.
 28. *Ni J., Barazangi M.* Seismotectonics of the Himalayan collision zone: geometry of the underthrusting Indian Plate beneath the Himalaya // *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 9 (B2). P. 1147–1163.
 29. *Oreshin S., Kiselev S., Vinnik L., Prakasam K.S., Rai S.S., Makeyeva L., Savvin Y.* Crust and mantle beneath Western Himalaya, Ladakh and Western Tibet from integrated seismic data // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2008. Vol. 271. № 1–4. P. 75–87.
 30. *Pandey M.R., Tandukar R.P., Avouac J.P., Lavé J., Mascot J.P.* Interseismic strain accumulation on the Himalayan crustal ramp (Nepal) // *Geophys. Res. Lett.* 1995. Vol. 22. № 7. P. 751–754.
 31. *Parameswaran R., Thulasiraman N., Rajendran K., Rajendran C.P., Mullick R., Wood M., Lehhak H.* Seismotectonics of the April–May 2015 Nepal earthquakes: An assessment based on the aftershock patterns, surface effects and deformation characteristics // *Asian J. Earth Sci.* 2015. Vol. 111. № 1. P. 161–174.
 32. *Prasath R.A., Paul A., Singh S.* Upper crustal stress and seismotectonics of the Garhwal Himalaya using small-to-moderate earthquakes: Implications to the local structures and free fluids // *Asian J. Earth Sci.* 2017. Vol. 135. P. 198–211.
 33. *Prasath R.A., Paul A., Singh S.* Earthquakes in the Garhwal Himalaya of the Central Seismic Gap: A Study of Historical and Present Seismicity and Their Implications to the Seismotectonics // *Pure Appl. Geophys.* Published on-line 13 June 2019. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02239-8>
 34. *Rajendran C.P., John B., Anandasabari K., Sanwal J., Kusala R., Kumar P., Sundeeep Ch.* On the paleoseismic evidence of the 1803 earthquake rupture (or lack of it) along the frontal thrust of the Kumaun Himalaya // *Tectonophysics*. 2018. Vol. 722. № 6. P. 227–234.
 35. *Schulte P.V., Monsalve G., Sheehan A., Pande M.R., Sapkota S., Bilham R., Wu F.* Imaging the Indian subcontinent beneath the Himalaya // *Nature*. 2005. Vol. 435(7046). P. 1222–1225.
 36. *Seeber L., Armbruster J., Quittmeyer R.C.* Seismicity and continental subduction in the Himalayan arc / In: *Zagros–Hindukush–Himalaya Geodynamic Evolution*. Gupta, F. Delany (eds.). AGU. Geodynam. Ser. 1981. Vol. 3. P. 215–242.
 37. *Srivastava P., Mitra G.* Thrust geometries and deep structure of the outer and lesser Himalaya, Kumaon and Garhwal (India): implications for evolution of the Himalayan fold-and-thrust belt // *Tectonics*. 1994. Vol. 13. № 1. P. 89–109.
 38. *Thakur V.C.* Active tectonics of Himalayan Frontal Thrust and seismic hazard to Ganga Plane // *Current Sci.* 2004. Vol. 86. № 11. P. 1554–1560
 39. *Warren B., Caldwell S.L., Klemperer J., Lawrence F., Shyam S., Ashish R.* Characterizing the Main Himalayan

- Thrust in the Garhwal Himalaya, India with receiver function CCP stacking // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2013. Vol. 367. P. 15–27.
40. *Wason H.R., Kumar J., Walia S.K.* Local seismicity of the Garhwal Himalaya subsequent to the Uttarakashi earthquake of October 20, 1991 // *Gondwana Research Group Mem.* 1999. № 6. P. 335–340.
41. *Valdiya K.S.* Geology of Kumaun Lesser Himalaya. (Dehradun: Wadia Inst. Himalayan Geol., 1980) 291 p.
42. *Yadav R., Tiwari V.M.* Numerical simulation of present day tectonic stress across the Indian subcontinent // *Int. J. Earth Sci.* Published on-line 2018, April, 04. <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1607-9>
43. *Yin A.* Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation // *Earth Sci. Rev.* 2006. Vol. 76. P. 1–131.
44. *Unsworth M.* Magnetotelluric studies of active continent–continent collisions // *Surv. Geophys.* 2010. Vol. 31. № 2. P. 137–161.
45. <http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/mapCustom.pl?l=0&lat=31&lon=78&num=200&rad=500> Каталог ФИЦ ЕГС РАН.
46. <http://geohazards.cr.usgs.gov/> Каталог USGS, USA за 2001-2010г.г., USGS National Earthquake Information Center (NEIC).

Deep Structure and Folded-Block Structure of the Garhwal Himalaya (India): Results of Integrated Geological and Geophysical Study

E. A. Rogozhin^{a,*}, E. Yu. Sokolova^a, S. N. Somala^b, N. V. Andreeva^a, M. C. Raghucharan^b

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 123995, Moscow, Russia*

^b*Indian Institute of Technology (IIT), 502285, Hyderabad, India*

**e-mail: eurog@ifz.ru*

The geological and geophysical study of the representative segment of the Alpine-Himalayan mobile belt—the Central zone of the Garhwal Himalaya, was conducted. The results of structural and geological studies in conjunction with the data on the deep structure obtained by geophysical methods, compared the speed of horizontal movements and the position of the hypocenters of seismic events, are presented. The successive decrease in the current rates of transverse compression is observed as we approach the maximum topographical heights of the geological and geophysical profile stretching across the Garhwal Himalaya. The large fault zones are shown, to which are related the foci of deep earthquakes.

Keywords: magnetotelluric sounding, tectonics, Himalaya, Garhwal, deep structure, crust, fault, thrust