

УДК 551.242.2+525.5+552.40

GPS-КИНЕМАТИКА СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЕВРАЗИАТСКОГО КОНТИНЕНТА И ЕЕ ВОЗМОЖНАЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

© 2021 г. В. И. Шевченко¹, И. С. Крупенникова¹, А. А. Лукк^{1,*}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: lukk@ifz.ru

Поступила в редакцию 23.12.2020 г.

После доработки 29.03.2021 г.

Принята к публикации 05.05.2021 г.

В геотектонике ныне ведущую роль играет неомобилистская плейттектоническая концепция. В ее основу положено представление о разделении земной коры/литосферы на плиты, блоки, массивы разного размера. Они перемещаются латерально в результате воздействия внешних по отношению к ним сил. Например, предполагается гравитационное соскальзывание плиты со срединно-океанического поднятия, горизонтальное смещение вслед за погружающимся в мантию тяжелым субдуцирующим слэбом. Наибольшее значение придается перемещению за счет вязкой связи плит с конвективными потоками в мантии. Не исключается механическое воздействие соседних литосферных плит. Накопленный к настоящему времени материал по геодезическим (в основном GPS) измерениям таких реальных перемещений в пределах Евразийского континента свидетельствует о том, что размеры его северной части значимо увеличиваются. Существующие представления о геодинамике земной коры/литосферы это явление не учитывают. В статье рассматриваются несколько вариантов возможной его интерпретации.

Ключевые слова: геодезические измерения, GPS-кинематика Евразии, геодинамическая интерпретация, плейттектоническая концепция, общее сжатие, объемный распор, фокальные механизмы.

DOI: 10.31857/S000233721060089

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в геотектонике ведущую роль играет неомобилистская плейттектоническая концепция. В ее основу положено представление о разделении земной коры/литосферы, на плиты, блоки, массивы разного размера. Выделяется несколько крупных литосферных плит (Евразийская, Африканская, Аравийская, Индо-Австралийская, Северо- и Южно-Американская, Антарктическая и Тихоокеанская), серия плит (мезоплит) меньшего размера, а также достаточно многочисленные микроплиты [Зоненшайн и др., 1976; Хаин, 2001; Хаин и др., 2005; и мн. др.]. Взаимные латеральные перемещения этих плит, блоков, массивов (конвергенция, коллизия, дивергенция, трансформные проскальзывания) рассматриваются как главные проявления и ведущие причины процессов тектогенеза разного ранга — от глобальных до локальных.

Результаты современных высокоточных геодезических измерений, с одной стороны, прямо соответствуют (в глобальном масштабе) основным положениям плейттектонической концепции [Кропоткин, 1992; Кропоткин и др., 1994; Хаин, 2001; Хаин и др., 2005]. Инструментально зафиксиро-

ваны, например, современный спрединг Атлантического и Индийского океанов, северный дрейф (относительно Евразии) Африканской, Аравийской и Индо-Австралийской литосферных плит [Cretaux et al., 1998; Gendt et al., 1997; Heflin et al., 2004; Larson et al., 1997; Rothacher et al., 1997; Sella et al., 2002; SOPAC] (см. рис. 1). “Оказалось, что скорости движения станций (геодезических — *авторы*), основанные на геодезических измерениях, отличаются от вычисленных по модели NUVEL-1 (один из вариантов плейттектонического расчленения и геодинамики коры/литосферы Земли — *авторы*) не более чем на 10% и близки по направлению смещений. В среднем коэффициент корреляции между моделью и результатами измерений составляет 0.989” [Кропоткин, 1992, с. 43].

Выделяются, кроме того, разновозрастные подвижные (складчатые, складчато-надвиговые) пояса (Средиземноморский, или Альпийско-Гималайский, Тихоокеанский, Урало-Монгольский, Северо-Атлантический, Арктический). В рамках плейттектонической концепции они рассматриваются как области сгущивания, акреции глыб, блоков, микроплит, террейнов, других элементов структуры коры/литосферы разного размера, разного происхождения. Предполагается, что эти

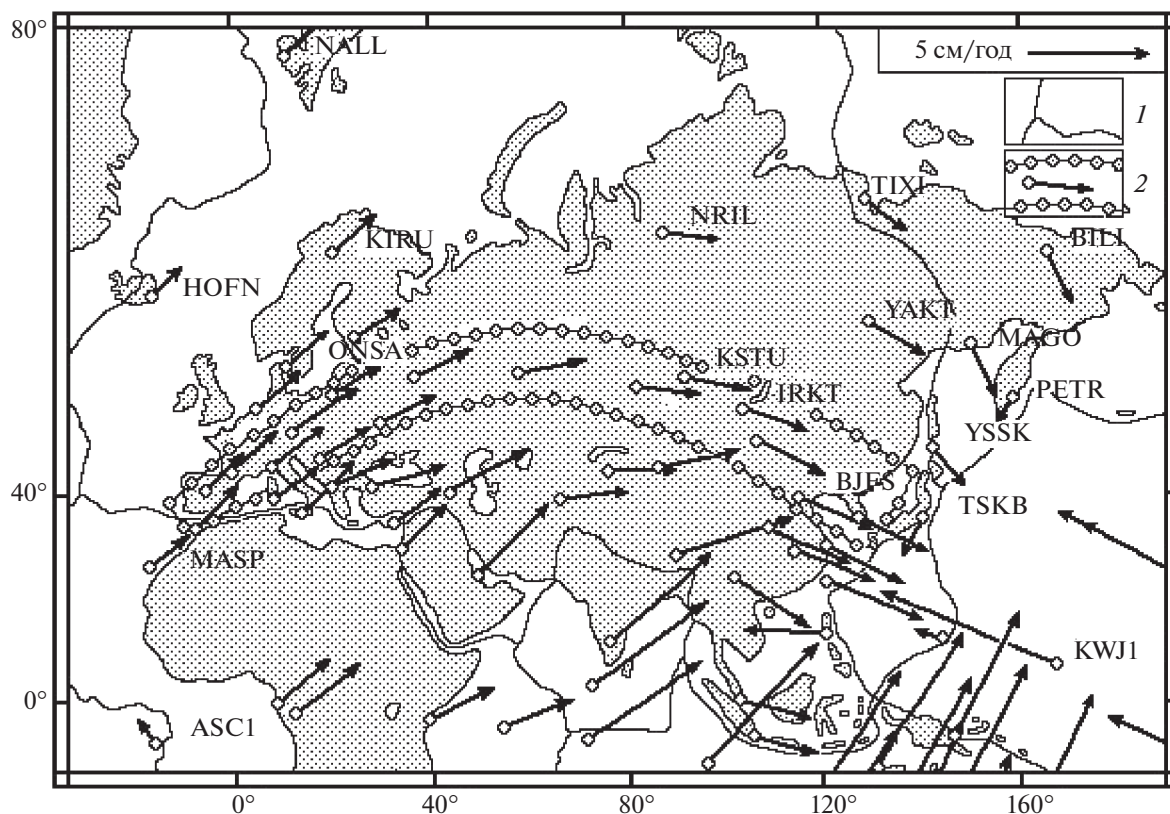


Рис. 1. Распределение векторов скоростей горизонтальных смещений геодезических GPS-станций, расположенных на Евразийской и смежных литосферных плитах [Hefflin et al., 2004] (система координат ITRF2004, фрагмент): 1 – границы литосферных плит; 2 – выделенная авторами анализируемая дугообразная полоса.

компоненты подвижных поясов сгужены, спрессованы и деформированы в результате сближения, конвергенции смежных более крупных литосферных плит.

Некоторые материалы по геологическому строению юрского–кайнозойского Средиземноморского, или Альпийско–Гималайского подвижного пояса (мы предпочитаем называть его Альпийско–Индонезийским), а также результаты геодезических GPS-измерений современных смещений элементов структуры этого подвижного пояса не согласуются, по крайней мере, с одним из основных положений плейтктонической концепции. Согласно этой концепции ширина подвижного пояса при сближении смежных литосферных плит должна уменьшиться. Породы пояса при этом деформируются. Однако прямые GPS-измерения в целом ряде случаев зафиксировали значимое увеличение ширины представительных частей Альпийско–Индонезийского пояса [Шевченко и др., 2017; 2018]. Это заставляет предположить существование механизма тектогенеза, не предусмотренного плейтктонической концепцией.

Имеются материалы, указывающие на то, что сходные несоответствия между некоторыми по-

стулатами плейтктонической концепции и результатами GPS-измерений существуют применительно, по крайней мере, к Евразийской литосферной плите.

Согласно представлениям, развиваемым в рамках этой концепции [Зоненшайн, 1976; Хаин, Ломизе, 2005; Новая ..., 1974], плиты, как упоминалось выше, могут латерально перемещаться, образуя при этом агломерации разного масштаба (вплоть до Пангеи), или делиться на части. Так как плиты не рассматриваются как абсолютно жесткие образования, допускается возможность некоторого их деформирования. Эти процессы происходят в результате тех или иных воздействий, внешних по отношению к упомянутым плитам, микроплитам, блокам коры/литосферы. Например, предполагается гравитационное соскальзывание плиты со срединно-океанического поднятия, горизонтальное смещение под воздействием тяги погружающегося в мантию тяжелого субдуцирующего слэба. Наибольшее значение придается перемещению за счет вязкой связи плит с конвективными потоками в мантии. Не исключается механическое воздействие соседних литосферных плит.

Оказалось, однако, что современная, по геодезическим GPS-измерениям выявленная кинематика большей северной части континента Евразия (основного компонента Евразийской литосферной плиты), располагающейся в общем севернее Альпийско-Индонезийского подвижного пояса, ни одному из перечисленных вариантов смещений не соответствует. Будем в дальнейшем называть эту (только континентальную) часть названной плиты Северной частью Евразийского континента (СЕК).

В рамках плейттектонической концепции считается, что Евразийская плита смещается в восточном направлении [Хаин и др., 2005]. Характер этого смещения на территории СЕК по результатам геодезических GPS-измерений за время от начала GPS-наблюдений по 2004 г. представлен в системе координат ITRF (рис 1). При этом западная часть СЕК смещается в ВСВ направлении, а восточная – в ВЮВ. Движение СЕК (в плане) идет в целом по пологой (выпуклой к северу) и столь плавной дуге, что это не позволяет предположить (на протяжении всех ее с запада на восток ~12000 км) разделение на несколько отдельных частей, блоков, микроплит. Менее бросается в глаза, что движение СЕК происходит с устойчиво нарастающей в том же восточном направлении скоростью

Территория СЕК в целом крайне неравномерно освещена геодезическими измерениями. Но в южной ее окраине (см. выделение на рис. 1) имеется продольная дугообразная полоса, (от Пиренейского полуострова на западе до Корейского на востоке), в пределах которой станции GPS распределены относительно равномерно и с достаточной плотностью. При этом векторы скоростей смещений этих станций устойчиво ориентированы вдоль упомянутой полосы. Перечисленные обстоятельства дают возможность выявить детально характер изменения скоростей горизонтальных смещений в пределах упомянутой дугообразной полосы.

Чтобы установить это изменение скорости мы привлекли к рассмотрению все имеющиеся на настоящее время табличные данные измерений полного горизонтального вектора скорости смещений GPS-станций и его восточной составляющей, содержащиеся в международной сводке [SOPAC – <http://sopac-csrc.ucsd.edu>]. Количественные характеристики величин и ориентировок этих векторов по интересующей нас территории сведены в табл. 1.

На основании этих количественных данных построены графики зависимости величин полного вектора скорости смещений (рис. 2а) и его восточного компонента (рис. 2б) от долготы местоположения GPS-станции. На этих графиках четко проявилось практически монотонное (что

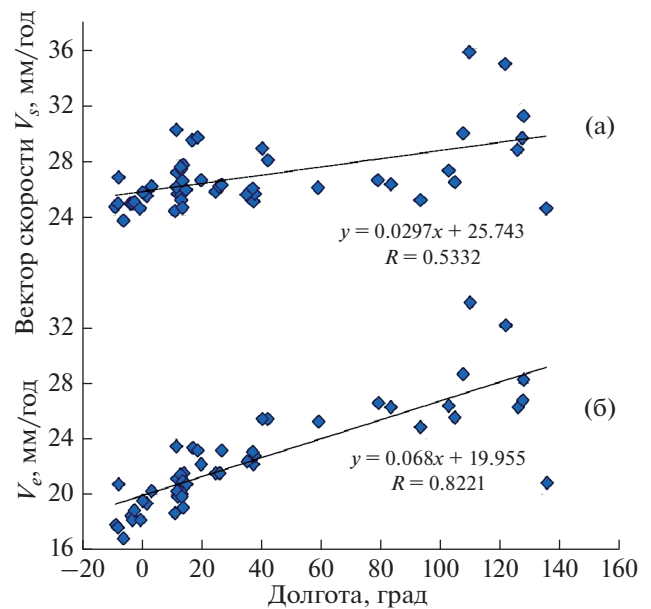


Рис. 2. Графики увеличения с запада на восток (по данным SOPAC¹ за все время GPS-измерений) полных векторов (а) и их восточных компонент (б) скоростей горизонтальных смещений GPS-станций, расположенных на Евразийском континенте в пределах выделенной на рис. 1 дугообразной полосы *R*-достоверности аппроксимации.

подтверждает целостность континента) увеличение скоростей смещений в направлении с запада на восток. По этим данным были вычислены соответствующие линии регрессии и их параметры.

Оказалось, что как полный горизонтальный вектор скоростей GPS-смещений, так и особенно его восточная компонента в рассматриваемой дугообразной полосе возрастают с запада на восток от ~26 до ~30 мм/год и от ~19 до ~29 мм/год соответственно. Это означает, что измеренные восточные смещения станций не могут быть объяснены только простым восточным смещением СЕК. Они однозначно указывают на продольное в направлении с запада на восток увеличение длины этой части литосферной плиты со скоростью ~4–10 мм/год.

Будем пока, до возможного появления противоречащих данных, предполагать, что результаты, полученные по территории дугообразной полосы, могут рассматриваться как представительные для всей территории СЕК, характеризующейся сходным рисунком расположения векторов скоростей смещений GPS-станций.

¹ <http://sopac-csrc.ucsd.edu>

Таблица 1. Кодовые имена, время начала работы, местоположение, кинематические характеристики GPS-станций

Станции	Год начала наблюдений*	Широта, град	Долгота, град	V_n , мм/год	σ_n , мм	V_e , мм/год	σ_e , мм	V_s , мм/год	Азимутград
Acor	2000	43.4	-8.4	16.9	0.1	20.8	0.1	26.8	51
Aqui	1999	42.4	13.4	17.3	0.1	21.6	0.1	27.7	51
Artu	2000	56.4	58.6	6.2	0.1	25.3	0.1	26.0	76
Badg	2011	51.8	102.2	-6.8	0.1	26.4	0.1	27.3	104
Bras	2000	44.1	11.1	16.9	0.2	21.2	0.2	27.1	51
Bucu	1999	44.5	26.1	12.3	0.1	23.2	0.1	26.3	62
Bzrg	1998	46.5	11.3	16.1	0.1	19.9	0.1	25.6	51
Cant	2001	43.5	-3.8	17.0	0.1	18.2	0.1	24.9	47
Casc	1998	38.7	-9.4	17.0	0.1	17.9	0.0	24.7	46
Cebr	2008	40.5	-4.4	16.7	0.4	18.5	0.3	24.9	48
Chan	2005	43.8	125.4	-11.6	0.1	26.3	0.1	28.7	114
Cose	1999	39.2	16.3	17.9	0.8	23.4	1.0	29.5	53
Esco	2000	42.7	1.0	16.5	0.1	19.4	0.1	25.5	50
Iavh	1998	34.0	-6.9	16.6	2.2	16.9	2.7	23.7	46
Irkt	1996	52.2	104.3	-6.7	0.1	25.6	0.1	26.5	105
Khaj	2002	48.5	135.0	-12.9	0.1	20.9	0.1	24.6	122
Krtv	2011	50.7	78.6	0.6	1.1	26.6	0.7	26.6	89
Kstu	1998	56.0	92.8	-3.6	0.6	24.9	0.4	25.2	98
Lago	2000	37.1	-8.7	17.5	0.1	17.7	0.1	24.9	45
Lamp	1999	35.5	12.6	18.6	0.1	20.1	0.1	27.4	47
Linz	2001	48.3	14.3	15.4	0.1	20.8	0.1	25.9	53
Lroc	2002	46.2	-1.2	16.5	0.1	18.2	0.1	24.6	48
M0se	2005	41.9	12.5	15.4	0.4	20.4	0.3	25.6	53
Mall	2001	39.6	2.6	16.5	0.1	20.3	0.1	26.2	51
Mdvj	2002	56.0	37.2	11.7	0.1	22.8	0.1	25.6	63
Mobj	2006	55.1	36.6	11.9	0.6	23.1	0.4	26.0	63
Mops	2007	44.6	10.9	19.0	0.3	23.5	0.4	30.2	51
Novm	2007	55.0	82.9	-0.2	0.2	26.3	0.2	26.3	90
Nvsk	2001	54.8	83.2	-1.1	0.2	26.5	0.2	26.5	92
Penc	1996	47.8	19.3	14.6	0.1	22.2	0.0	26.6	57
Polv	2001	49.6	34.5	12.3	0.1	22.4	0.1	25.6	61
Pots	1995	52.4	13.1	15.5	0.1	19.1	0.1	24.6	51
Ptbb	2000	52.3	10.5	15.6	0.1	18.7	0.1	24.4	50
Rove	2006	45.9	11.0	16.4	0.4	20.3	0.3	26.1	51
Shao	1995	31.1	121.2	-13.6	0.1	32.2	0.1	35.0	113
Sulp	2002	49.8	24.0	14.0	0.1	21.6	0.1	25.7	57
Suwn	1998	37.3	127.1	-12.6	0.1	26.8	0.1	29.6	115
Taej	1996	36.4	127.4	-13.1	0.6	28.3	0.6	31.2	115
Trab	2000	41.0	39.8	13.5	0.1	25.5	0.1	28.9	62
Ulab	2001	47.9	107.1	-8.6	0.1	28.7	0.2	30.0	107
Unpg	1998	43.1	12.4	17.2	0.1	21.5	0.1	27.5	51
Untr	2007	42.6	12.7	15.4	0.5	19.9	1.0	25.2	52
Usal	2010	40.3	18.1	18.5	0.2	23.2	0.3	29.7	51
Vale	2001	39.5	-0.3	16.6	0.1	19.6	0.1	25.7	50
Vlms	1999	54.7	25.3	14.7	0.6	21.6	0.6	26.1	56
Xian	1996	34.4	109.2	-11.8	0.7	33.8	0.9	35.8	109
Yebe	2001	40.5	-3.1	16.4	0.0	18.9	0.0	25.0	49
Zeck	1998	43.8	41.6	11.6	0.0	25.5	0.1	28.0	66
Zouf	2003	46.6	13.0	16.2	0.1	21.0	0.1	26.5	52
Zwe2	2005	55.7	36.8	11.6	0.4	22.2	0.5	25.0	62

Примечания: V_n – северная, V_e – восточная компоненты полного горизонтального вектора скорости смещений GPS-станций; V_s – полный горизонтальный вектор скорости смещений GPS-станций; σ_n , σ_e – ошибки северной и восточной компонент; азимут – ориентация полного вектора.

* Большинство перечисленных GPS-станций продолжают работать вплоть до настоящего времени.

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ВОСТОЧНОГО УДЛИНЕНИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЕВРАЗИАТСКОГО КОНТИНЕНТА

Можно предположить не менее пяти причин удлинения рассматриваемой части Евразийского континента.

1. Причиной удлинения могло бы быть продольное, в направлении запад – восток, реальное горизонтальное *растяжение* плиты, вызванное, например, откатом на восток зоны перегиба субдуцирующей части смежной Тихоокеанской плиты. Такой механизм можно предположить по аналогии с представлениями, существующими применительно к некоторым районам Средиземноморья [Лобковский и др., 2004; Facenna et al., 2001]. Однако растягивающее усилие, приложенное к восточному краю СЕк, во-первых, должно бы максимально проявиться на этом его краю, а не равномерно на всем его, ~12 тыс. км, протяжении. Во-вторых, такое внешне приложенное растягивающее усилие не может действовать (в плане) по дугообразным направлениям, характерным для рассматриваемой части континента.

2. Ускоряющееся движение и *растяжение* по дуге можно себе также представить, если предположить, что на некоторой глубине (по-видимому, в астеносфере) располагается дугообразный (в плане), ускоряющийся с Z на V поток мантийного материала, вызывающий соответствующее движение и растяжение в вышележащей литосфере. Но объективные признаки существования такого потока на глубине отсутствуют. А на восточной границе СЕк хорошо известно движение в противоположном, с V на Z направлении – субдукция тихоокеанской коры/литосферы.

Поэтому предположение о напряженном состоянии продольного *растяжения* СЕк представляется недостаточно обоснованным. Приходится говорить не о предполагаемом *напряженном состоянии растяжения* СЕк, а об установленной *деформации ее удлинения*. Имеются два локальных исключения из этого правила (см. далее), связанные с Байкальским и Верхнерейнским грабенами.

Две возможные внешние причины упомянутого *удлинения* рассмотрены далее.

3. Причиной увеличения длины СЕк могло бы быть пропорциональное уменьшение ее ширины (ныне не менее ~3–4 тыс. км) вследствие реконструируемого в рамках плейттектонической концепции давления на нее по линии ~юг–север дрейфующих в этом направлении Африканской, Аравийской и Индо-Австралийской литосферных плит. Предполагаемое за счет давления с юга уменьшение ширины СЕк (и упомянутой выше дугообразной полосы в том числе) должно было бы проявиться в том, что векторы скоростей GPS-станций в пределах рассматриваемой территории должны были бы быть систематически на-

правлены под некоторым острым углом к направлению общего продольного по дуге смещения СЕк, указывая тем самым на сближение станций друг с другом, указывая на некоторое их перемещение в направлении вкост смещения континента в целом. Как можно видеть на рис. 1, векторы скоростей смещений GPS-станций на СЕк в пределах рассматриваемой территории и дугообразной полосы ориентированы, с учетом точности измерений и вполне возможным влиянием местных деформаций, практически параллельно друг другу. Наиболее четко это видно на территории хорошо изученной Западной Европы. Это позволяет сделать вывод об отсутствии предполагаемого современного уменьшения ширины СЕк (и дугообразной полосы), компенсирующего установленное их удлинение.

4. Северная часть Евразийского континента (СЕк) могла бы удлиняться (но без напряженного состояния растяжения!), растекаясь, расплющиваясь под действием собственного веса, т.е. под действием вертикального (гравитационного) сжатия. Растекание, движение материала горных пород по горизонтали, в таком случае представляло бы собой явление вторичное, производное от вертикального сжатия. Горизонтальное напряжение сжатия должно было бы быть меньше исходного вертикального. Однако, как показано в работе [Кропоткин, 1973], субгоризонтальное сжатие в земной коре, как правило, больше вертикального (т.е. больше литостатической нагрузки), нередко многократно больше. Следовательно, наблюдаемое течение материала СЕк не может быть вызвано ее собственным весом, не может быть следствием расплющивания, утонения участвующей в процессе удлинения части плиты.

5. На еще одну возможность удлинения СЕк в восточном направлении под действием внешней для нее причины указал один из рецензентов данной статьи.

В рамках плейттектонической концепции распространено представление о вращении литосферных плит вокруг неких центров вращения (полюсов Эйлера). Рассматриваемый здесь вариант интерпретации исходит из представления о том, что увеличение с запада на восток скорости движения в восточном направлении Евразийского континента (или его рассматриваемой части – дугообразной полосы) происходит в результате того, что континент и, соответственно, дугообразная полоса находятся в пределах крупной литосферной плиты, вращающейся упомянутым образом. При этом не требует доказательств то, что линейная скорость смещения любого произвольно выбранного пункта в пределах плиты (и дуги) прямо зависит от его расстояния по радиусу R от центра вращения. Чем больше расстояние от центра, тем больше линейная скорость пункта.

Для более ясного дальнейшего изложения можно представить себе описанную выше картину вращения плиты в схематизированном виде. Предположим, что вокруг центра вращения, на последовательно возрастающих расстояниях R_n располагаются узкие кольца, на которые условно разделяются плита и входящие в ее состав элементы тектонической структуры — в том числе Евразия и дугообразная полоса. Получается нечто вроде “колец Сатурна”, если говорить только об их геометрии. Каждое “кольцо” характеризуется своей скоростью вращения, возрастающей от “кольца” к “кольцу” по мере удаления от центра вращения. Скорости линейного смещения любого произвольно выбранного пункта на любом из “колец” остаются постоянными в пределах каждого “кольца”. Векторы скоростей ориентированы параллельно границам “колец”.

Согласно рассматриваемому здесь варианту интерпретации GPS-кинематики Евразии и, в том числе, упомянутой дугообразной полосы, эта последняя располагается на вращающейся плите, на “кольцах Сатурна” таким образом, что ее западное, Пиренейское окончание находится ближе к центру вращения “колец”, чем восточное, корейское окончание. Первое, соответственно, располагается на медленнее движущемся, а второе — на более скоростном “кольце”. Промежуточные части дуги — на промежуточных “кольцах”.

Предполагается, таким образом, что горизонтальные скорости смещения разных пунктов рассматриваемой дугообразной полосы определяются скоростями вращения соответствующих “колец Сатурна”. Пункты в западной части дуги, располагающейся, по условиям задачи, ближе к центру вращения, будут смещаться с наименьшей скоростью. В восточном направлении по дуге, т.е. с удалением от центра вращения, скорости будут последовательно нарастать. Предполагается, что дуга в результате будет удлиняться.

Однако если величина векторов скорости смещений GPS-пунктов рассматриваемой дуги определяется скоростями соответствующих “колец Сатурна”, то, естественно, одновременно таким же способом определяются ориентировки этих же векторов скоростей пунктов дуги. Векторы пунктов самих “колец” ориентированы, как уже упоминалось, вдоль границ “колец”. Поскольку дугообразная полоса пересекает, по условиям задачи, границы “колец” под различными углами, векторы скоростей смещений “колец” и, соответственно, векторы смещений GPS-станций дугообразной полосы должны пересекать под теми же углами границы этой полосы. В результате полоса будет непредсказуемо деформирована и, возможно, даже укорочена.

В действительности, как уже упоминалось (см. рис. 1), векторы возрастающих скоростей смеще-

ний GPS-станций рассматриваемой полосы ориентированы практически параллельно ее границам или ее оси. Только в этом случае гарантируется наблюдаемое удлинение дуги. Это отличие картины, рисуемой в рассмотренном варианте интерпретации GPS-кинематики дугообразной полосы от реально существующей картины, позволяет нам и этот вариант интерпретации удлинения рассматриваемой дугообразной полосы считать неприемлемым.

НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ДЛИНЫ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЕВРАЗИАТСКОГО КОНТИНЕНТА

Таким образом, геодезические измерения выявили значимое современное увеличение длины СЕК и неизменность ее ширины. Тем самым является возможность говорить о современном **увеличении площади** рассматриваемой части Евразийского континента. Одновременно необходимо помнить, что это увеличение длины и площади не может быть следствием его расплющивания, утонения. Возникающее при этом сочетание перечисленных данных означает, тем самым, предположительное **увеличение объема** пород рассматриваемой части литосферной плиты.

Это заключение сделано на основе, главным образом, результатов геодезических измерений. Рассмотрены несколько вариантов внешнего (по отношению к элементам тектонической структуры) воздействия на кору/литосферу СЕК: продольное растяжение, поперечные горизонтальное и вертикальное сжатия, определенное положение в пределах вращающейся литосферной плиты. Эти воздействия не могут объяснить существование наблюдаемой картины. Поэтому объяснения этой картины с их помощью представляются неприемлемыми. Вследствие этого приходится обратиться к возможным внутренним источникам тектогенеза. Для этого необходимо дополнительно обратиться к результатам изучения напряженно-деформированного состояния коры/литосферы по механизмам очагов немногочисленных землетрясений региона.

С этой целью мы привлекли результаты изучения напряженно-деформированного состояния коры/литосферы по совокупностям фокальных механизмов землетрясений региона в пределах восьми пространственных прямоугольных выборок со стороны от 100 до 800 км по методике С.Л. Юнги [1990]. Построенные в пределах таких выборок по данным каталога ISC средние фокальные механизмы приведены на рис. 3. Для подавляющего большинства (шесть из восьми) этих средних механизмов характерны горизонтальные, субгоризонтальные напряжения сжатия (укорочения) P , расположенные веерообразно. Они ориентированы вкрест рассмотренной выше (рис. 1) ду-

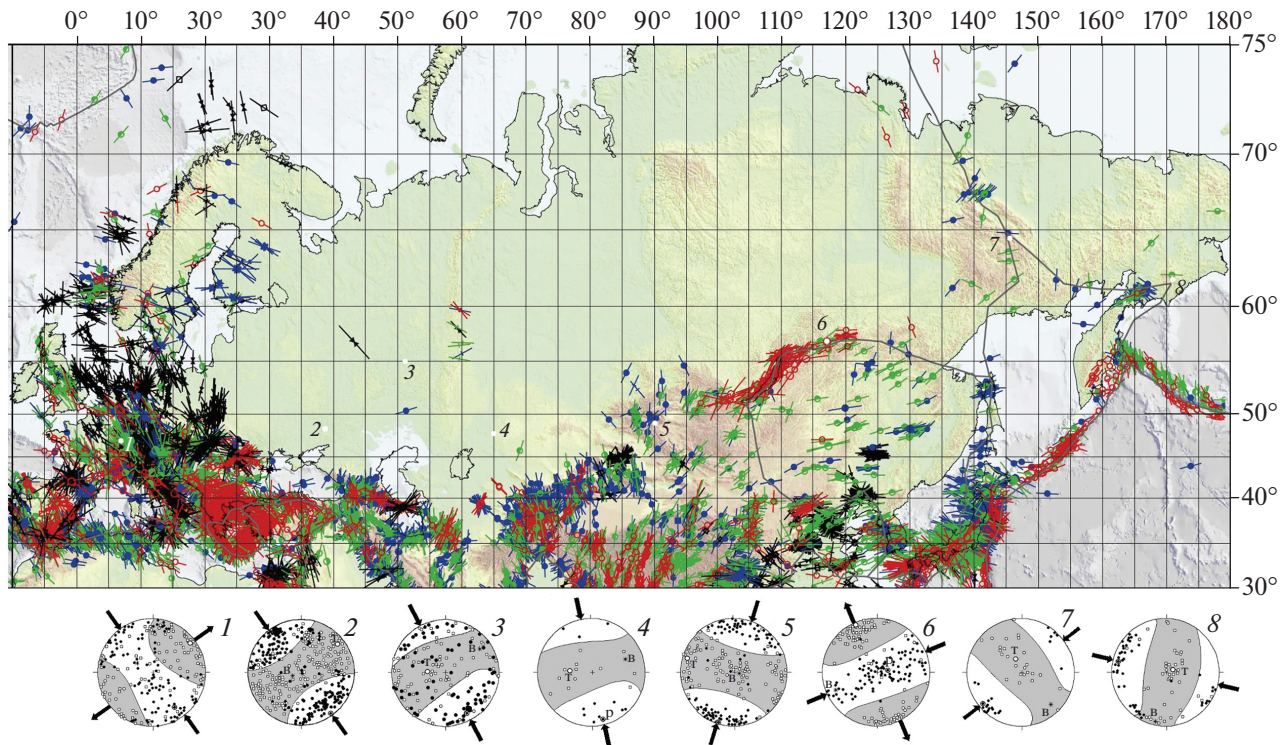


Рис. 3. Расчетные средние фокальные механизмы землетрясений по данным каталога ISC в пределах прямоугольных пространственных выборок (1–8) со стороной ~100–800 км на территории Евразийского континента. В качестве основы выбрана схема ориентаций максимальных горизонтальных напряжений S_{Hmax} как части полной карты 2018 г., опубликованной в работе [Heidbach et al., 2018].

гообразной полосы и векторов скоростей смещения станций GPS-измерений. Оси растяжения (удлинения) T направлены вдоль той же полосы и векторов скоростей, но наклонены под различными углами.

Такую картину можно было бы объяснить уже упоминавшимся реконструируемым в рамках плетектонической концепции давлением на СЕК по линии ~юг–север дрейфующих в этом направлении Африканской, Аравийской и Индо-Австралийской литосферных плит. В связи с этим предположением отметим, что в настоящее время перечисленные плиты (и южная часть Евразийского континента) согласованно перемещаются не в северном, а в СВ направлении (см. рис. 1). В результате на западе рассматриваемого региона названная группа плит смещается практически параллельно простиранию западной части выделенной дугообразной полосы и векторам скоростей смещений GPS-станций СЕК, а на востоке – вкрест их же восточных продолжений. Но это различие никак не сказывается на ориентации осей сжатия на территории СЕК (см. рис. 3). Их ориентация соответствует в плане только дугообразному расположению векторов скоростей и, в том числе, дугообразной выделенной полосы. Следовательно, пространственная корреляция между

веерообразным положением осей сжатия на территории СЕК и однообразным СВ направлением смещения Африканской, Аравийской и Индо-Австралийской литосферных плит в настоящее время (только в настоящее время?) отсутствует. Это позволяет предположить соответствующее отсутствие генетической связи между ними и, следовательно, отсутствие явных признаков воздействия на СЕК перечисленных плит, смещающихся в северном (СВ) направлении.

С одной стороны, сейсмологические материалы свидетельствуют о существовании на территории СЕК полого и веерообразно ориентированных осей напряжений сжатия (укорочения). С другой – упомянутое параллельное расположение векторов скоростей смещений GPS-станций показывает, что сокращение, укорочение названной территории в направлении осей сжатия не происходит.

Со сходной и даже еще более странной ситуацией мы столкнулись при изучении геодинамики Таджикской депрессии и Большого Кавказа [Шевченко, 1984; Шевченко и др., 2017]. На их территориях в направлении осей сжатия (установленных по ориентации тектонических дислокаций сжатия – складок, надвигов – и по механизмам очагов землетрясений) геодезические измерения

выявили не предполагавшееся плейттектоническое сокращение, укорочение, а увеличение ширины названных подвижных сооружений. Было предложено объяснять это явление увеличением объема (и площади) слоистых горных пород этих сооружений в результате привноса в них глубинными флюидами дополнительного минерального материала и его последующей кристаллизации. Аналогичные сочетания геологических, сейсмологических и геодезических данных можно обнаружить в литературных источниках по территории Пиренеев, Апеннин, Альп, Карпат-Динарид Альпийского подвижного пояса (см. [Шевченко и др., 2017; 2018]).

Опираясь на сходство внешне противоречащих друг другу результатов сейсмологических и геодезических исследований этих подвижных сооружений и СЕк, мы предполагаем, что и механизм возникновения напряженного состояния сжатия слоистых пород в этих случаях сходен. Различие заключается в том, что в Таджикской депрессии и на Большом Кавказе известный нам прирост площади слоистых пород происходит в направлении вкрест простирания тектонической структуры (сооружения становятся шире), а на территории СЕк – по ее простиранию (она удлиняется). Предположительно, (по аналогии с Эгейским сегментом Альпийско-Индонезийского подвижного пояса [Шевченко и др., 2001; 2017]), это связано с тем, что в случае Большого Кавказа и Таджикской депрессии области предполагаемого нами прироста площади (прогибы, синклинории) и области наименьшего сопротивления приросту (поднятия, антиклинории) чередуются в направлении вкрест простирания названных сооружений. А применительно к СЕк, предположительно, область наименьшего сопротивления расширению (Тихоокеанская впадина?) сменяет область расширения (СЕк) по простиранию, в восточном направлении.

Предполагается, что главным результатом увеличения объема слоев, толщ слоистых пород является увеличение их площади [Шевченко и др., 2017]. В большинстве случаев это увеличение, расширение встречает сопротивление рядом расположенных частей тектонической структуры. В результате в породах расширяющихся частей структуры возникает напряженное состояние объемного распора, которое по механизмам очагов землетрясений воспринимается как сжатие.

Поскольку процесс увеличения объема сам по себе есть процесс пространственно изотропный, возникшие оси сжатия (распора) будут ориентированы равномерно во все стороны. Но если в какой-то смежной части земной коры/литосферы оказывается область относительно пониженного напряженного состояния сжатия, материал горных пород, находящихся в состоянии распора,

неизбежно начнет перетекать в эту область. В результате в направлении перетекания, исходная величина напряжения распора–сжатия понизится, что на языке сейсмотектоники позволит говорить о возникновении направления пониженного (минимального) сжатия или даже растяжения. А в направлении вкрест перетекания сохранится напряжение распора–сжатия, возникшее при исходном увеличении объема пород. Предлагаемый механизм тектогенеза в результате увеличения объема пород не предполагает существование обстановки реального растяжения, а только минимального сжатия. Как отмечалось выше (см. пп. 1 и 2), предположение о внешнем источнике растяжения (а не удлинения) также встречается в рассматриваемом случае с существенными затруднениями.

Вместе с тем можно видеть картину реального растяжения в продольном к СЕк направлении, если обратиться к зоне Байкальского грабена–Станового хребта (стереограмма-выборка *R6* на рис. 3). В этом случае обстановка реального субгоризонтального растяжения (на фоне обстановки регионального сжатия) следует из самого факта существования названного грабена, а также из результатов тектонофизических исследований в Становом хребте [Леви и др., 1997]. Вероятно, сходная обстановка имеет место и в Западной Европе (стереограмма-выборка *R1* на рис. 3) в связи, по-видимому, с Верхнерейнским грабеном. Эта ориентация растягивающих напряжений показана соответствующим знаком на стереограммах-выборках *R1* и *R6* на рис. 3.

Получается, с одной стороны, судя по результатам геодезических измерений площадь и объем пород СЕк в настоящее время увеличиваются. С другой стороны, эта же часть Евразийского континента как целое находится в напряженном состоянии сжатия. Такое же сочетание аналогичных данных мы уже получили при изучении тектонической структуры и современной геодинамики некоторых подвижных поясов и сооружений. Предложенная в этом случае [Шевченко, 1984; Шевченко и др., 2017; 2018] интерпретация (увеличение объема слоистых пород в результате привноса в них и последующей кристаллизации дополнительного минерального материала) по нашему мнению, наилучшим образом объясняет весь комплекс приведенных выше данных о современной геодинамике СЕк.

ВЫВОДЫ

Известные для территории северной части Евразийского континента (СЕк) геодезические измерения выявили характерные для всего этого региона горизонтальные смещения GPS-станций с запада на восток, происходящие по пологим, выпуклым к северу дугам.

Установлено, что в пределах южной, наиболее полно изученной окраины СЕк, в пределах дугообразной полосы скорости упомянутых восточных смещений GPS-станций монотонно возрастают с запада на восток, что означает продольное, в этом направлении, увеличение длины рассматриваемой части континента. Скорость удлинения определена в ~4–10 мм/год. Одновременно те же геодезические измерения говорят о неизменности ширины дугообразной полосы, т.е., тем самым, об увеличении ее площади.

По данным совокупностей фокальных механизмов землетрясений в шести из восьми пространственных выборок в пределах СЕк установлена веерообразная, вкрест упомянутых дуг и восточных смещений GPS-станций ориентация осей напряжений максимального субгоризонтального сжатия (укорочения). Это свидетельствует о преобладании напряжений субгоризонтального сжатия в рассматриваемой части земной коры. В направлении продольного удлинения Евразийского континента ориентированы оси минимального сжатия. В двух случаях зафиксирована обстановка абсолютного растяжения.

Предполагается, что увеличение длины и площади рассмотренной части СЕк, происходящее в земной коре (или литосфере?), находящейся в напряженном состоянии субгоризонтального сжатия, может происходить только за счёт развития в коре/литосфере напряжений распора, обусловленных увеличением объема (и площади) слоистых горных пород в результате привноса в них глубинными флюидами из низов коры/верхов мантии дополнительного минерального материала и его последующей кристаллизации.

Неясными остаются, по крайней мере, два вопроса. Во-первых, перемещается ли СЕк (неотъемлемая часть Евразийской литосферной плиты) латерально так, как это подразумевается в рамках плейттектонической концепции, но одновременно удлиняется, или видимость восточного перемещения СЕк создается в результате только его удлинения? Во-вторых, свойственно ли такое удлинение всей территории Евразийского континента, Евразийской литосферной плиты, другим плитам или это единственное в своем роде явление?

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по проекту № 0144-2019-0011 государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Моралев В.М. Глобальная тектоника, магматизм и металлогения. 1976. М.: Недра. 231 с.

Кропоткин П.Н. Тектонические напряжения в земной коре по данным непосредственных измерений. Напряженное состояние земной коры. 1973. М.: Наука. С. 21–31.

Кропоткин П.Н. Теория тектоники литосферных плит и геодезические измерения // Природа. 1992. № 7. С. 42–43.

Леви К.Г., Аржанникова А.В., Буддо В.Ю., Кирилов П.Г., Лухнёв А.В., Мирошниченко А.И., Ружич В.В., Саньков В.А. Современная геодинамика Байкальского рифта // Разведка и охрана недр. 1997. № 1. С. 10–20.

Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. 2004. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. 2004. М.: Научный мир. 612 с.

Новая глобальная тектоника. 1974. М.: МИР. 472 с.

Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. 2001. М.: Научный мир. 606 с.

Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. 2005. М.: изд-во Моск. ун-та. 560 с.

Шевченко В.И. Происхождение структур горизонтального сжатия в складчатом сооружении. 1984. М.: Наука. 160 с.

Шевченко В.И., Добровольский И.П., Лукк А.А. Напряженно-деформированное состояние литосферы эгейского сектора Средиземноморского подвижного пояса // Физика Земли. 2001. № 12. С. 52–63.

Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В. Автономная и плейттектоническая геодинамика некоторых подвижных поясов и сооружений. 2017. М.: ГЕОС. 612 с.

Шевченко В.И., Гусева Т.В., Добровольский И.П., Крупеникова И.С., Лукк А.А. Автономная (неплейттектоническая) геодинамика Пиренеев // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 17. № 1. С. 77–108.

Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. 1990. М.: Наука. 191 с.

Cretaux J.-F., Soudarin L., Cazenave A., Bouile F. Present-day tectonic plate motions and crustal deformations from the DORIS space system // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № B12. P. 30176–30181.

Faccenna C., Becker T.W., Lucente F.P., Jolivet Z., Rossetti F. History of subduction and back-arc extension in the Central Mediterranean // Geophys. J. Int. 2001. V. 145. № 3. P. 809–820.

Heflin M., Moore A., Murphy D., Desai S., Bertiger W., Haines B., Kuang D., Sibthorpe A., Sibois A., Ries P., Hemberger D., Dietrich A. GPS Time Series. 2004. <http://side-show.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>

Heidbach O., Custodio S., Kingdon A., Mariucci M.T., Montone P., Müller B., Pierdominici S., Rajabi M., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Williams J., Ziegler M. Stress Map of the Mediterranean and Central Europe 2016. GFZ. Data Service. 2016. <https://doi.org/10.5880/WSM.Europe2016>

Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M.L., M. Zoback M.D. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales // Tectonophysics. 2018. V. 744. P. 484–498.

International Seismological Centre (ISC), On-line Bulletin, 2020. Available from: <http://www.isc.ac.uk>

Larson K.M., Freymueller J.T., Philipson S. Global plate velocities from Global Positioning System // J. Geoph. Res. 1997. V. 102. № B5. P. 9961–9981.

Rothacher M., Springer T.A., Schaer S., Beutler G., Brockmann E., Wild A., Wiget A., Boucher C., Botton S., Seeger H. Annual report 1996 of the CODE Analysis center of the

IGS. International GPS service for geodynamics. 1996 annual report. 1997. P. 201–219.

Sella G.F., Dixon T., Mao A. REVEL: a model for recent plate velocities from space geodesy // J. Geoph. Res. 2002. V. 107. № B4. P. ETG11 1–32.

SOPAC <http://sopac-csrc.ucsd.edu>

GPS Kinematics of the Northern Part of the Eurasian Continent and Its Possible Geodynamic Interpretation

V. I. Shevchenko^a, I. S. Krupennikova^a, and A. A. Lukk^{a,*}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

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

The leading role in geotectonics is currently played by the neomobilistic plate tectonic concept which is based on the division of the Earth's crust/lithosphere into plates, blocks, and massifs of different sizes. These crustal units move laterally, driven by the forces that are external to them. For example, it is assumed that under the action of gravity, a plate slips off the mid ocean ridge and then moves horizontally following the heavy subducting slab which sinks into the mantle. The motion due to viscous coupling between the plates and the convective flow in the mantle is considered as most important factor. Mechanical action from the neighboring lithospheric plates is not excluded. The data accumulated to date on the geodetic (mainly GPS) measurements of these real movements within the Eurasian continent indicate that the size of the northern part of the latter has significantly increased. The existing notions about the geodynamics of the Earth's crust/lithosphere disregard this phenomenon. Its several possible interpretations are discussed.

Keywords: geodetic measurements, GPS kinematics of Eurasia, geodynamic interpretation, plate tectonic concept, overall compression, all-round outward pressure, focal mechanisms