УДК 551.528.2/.2

АНАЛИЗ ГИПОТЕЗЫ ТЕКТОНИКИ ПЛИТ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ДАННЫХ ДРУГИХ НАУК О ЗЕМЛЕ

д-р физ.-мат. наук, проф. В.Н. КОРОВКИН,
канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА, В.А. ПАРФЕНЕНКО

Представлен анализ гипотезы тектоники плит по результатам геодезических измерений и данных других наук о Земле. В ходе исследований была поставлена задача анализа гипотезы тектоники плит по трем видам экспериментальных данных: результатам наземных линейно-угловых измерений на прогностических геодинамических полигонах; палеомагнитным данным; результатам космических измерений. Приведенный анализ результатов наземных геодезических измерений для трех Камчатских геодинамических полигонов, выполненные для них расчеты по палеомагнитным данным и результаты космических измерений свидетельствуют в пользу гипотезы тектоники плит.

Гипотеза тектоники плит и результаты геодезических измерений на Камчатских геодинамических полигонах. Для анализа гипотезы тектоники литосферных плит по данным наземных геодезических измерений были использованы результаты повторных линейно-угловых измерений, выполненных в период 1974 – 1981 годов на Карымском, Шипунском и Петропавловском геодинамических полигонах (ГДП). Эти полигоны, представляющие собой плановые линейно-угловые сплошные сети, построены в виде системы треугольников и расположены на восточном побережье полуострова Камчатка, находящегося на стыке Тихоокеанской и Евразиатской тектонических плит, граница между которыми обозначена Тихоокеанской сейсмофокальной зоной (рис. 1). Каждый из них занимает территорию порядка 3 тыс. км^2; средний из полигонов (Шипунский) находится на расстоянии примерно 100 км от северного Карымского ГДП и юго-западного Петропавловского.

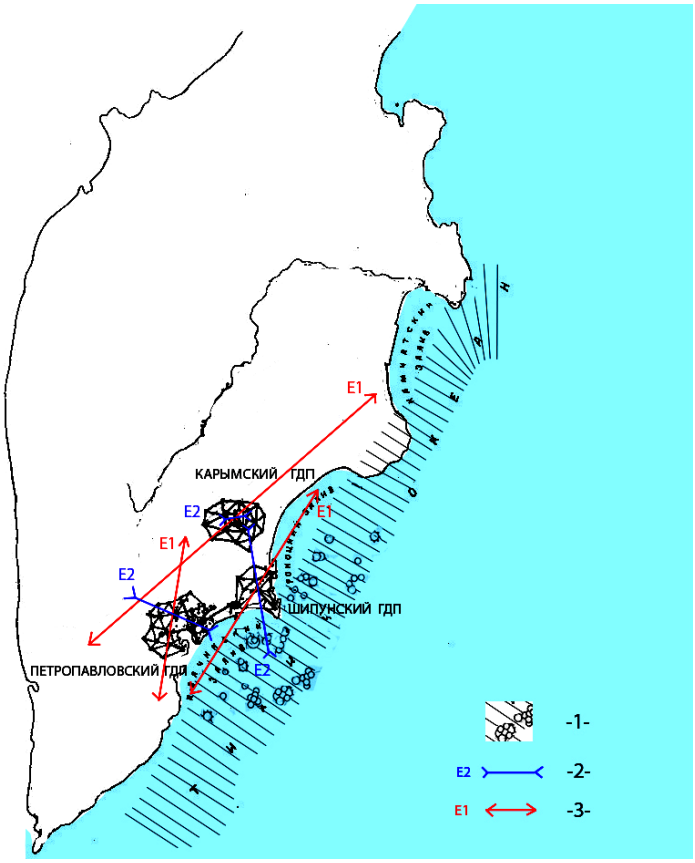
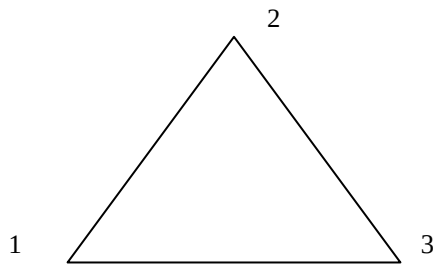


Рис. 1. Схема расположения ГДП на восточном побережье полуострова Камчатка
1 – сейсмофокальная зона (стык океанической Тихоокеанской и континентальной Евразиатской плит);
2, 3 – направления минимального *E*2 и максимального *E*1 растяжений

На выбранных полигонах для каждого треугольника геодезической сети, принятого за конечный элемент, по разностям координат его вершин между сравниваемыми эпохами геодезических измерений были вычислены максимальное $E1$ и минимальное $E2$ растяжения и их направления φ_{E1} и φ_{E2} по методике определения компонентов деформации [1, 2], представленной ниже.

Согласно этой методике для каждого отдельного треугольника сети, например Δ 1 2 3, составляется система из шести линейных уравнений:



$$\begin{cases} \Delta X_1 = X_1 e_{11} + Y_1 e_{12} + a; \\ \Delta Y_1 = X_1 e_{21} + Y_1 e_{22} + b; \\ \Delta X_2 = X_2 e_{11} + Y_2 e_{12} + a; \\ \Delta Y_2 = X_2 e_{21} + Y_2 e_{22} + b; \\ \Delta X_3 = X_3 e_{11} + Y_3 e_{12} + a; \\ \Delta Y_3 = X_3 e_{21} + Y_3 e_{22} + b, \end{cases} \tag{1}$$

где ΔX, ΔY – разности уравненных координат вершин треугольника сети; a, b – величины поступательного перемещения по осям X, Y.

Из решения этой системы определяется тензор второго ранга на плоскости с матрицей из четырех компонентов, относящийся к центру треугольника:

$$\left|T_{ij}\right| = \begin{vmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{vmatrix}, \tag{2}$$

который позволяет определить интересующие нас компоненты деформации:

$$E1 = Q + \frac{1}{2}\sqrt{\left(e_{11} - e_{22}\right)^2 + \left(e_{12} + e_{21}\right)^2}\ ; \tag{3}$$

$$E2 = Q - \frac{1}{2}\sqrt{\left(e_{11} - e_{22}\right)^2 + \left(e_{12} + e_{21}\right)^2}\ ; \tag{4}$$

$$\varphi_{E1,(E2)} = \frac{1}{2} arctg\left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right) + (90^0) \tag{5}$$

где $Q = \frac{e_{11} + e_{22}}{2}$ – дилатация; $\gamma_1 = e_{11} - e_{22}$ и $\gamma_2 = e_{12} + e_{21}$ – компоненты сдвига.

Выбор именно этих компонентов деформации обусловлен следующим. Согласно теории деформации любой участок поверхности, находящийся в состоянии однородного деформирования, характеризуется двумя взаимно перпендикулярными направлениями, деформации по которым экстремальны. Эти направления называются направлениями максимального φ_{E1} и минимального φ_{E2} растяжений.

Если предположить, что деформации земной коры на восточном побережье Камчатки обусловлены в основном расположением полуострова на стыке двух тектонических плит (континентальной Евразиатской и океанической Тихоокеанской), то согласно гипотезе тектоники плит можно ожидать следующее. Постоянно расширяющаяся океаническая плита вызовет минимальное растяжение исследуемой территории в направлении движения Тихоокеанской плиты (примерно перпендикулярно береговой линии полуострова), а максимальное растяжение, соответственно, вдоль нее. Абсолютных величин экстремальных деформаций вышеизложенная методика не позволяет определить, так как согласно ей все компоненты деформации получаются в относительной мере, но закономерности направлений максимального и минимального растяжений по ней можно проследить.

Поэтому с определенной степенью приближения, вызванного, прежде всего, нестрогостью нашего предположения об однородном состоянии земной коры на исследуемых полигонах, следует ожидать, что результирующие векторы максимальных и минимальных растяжений на каждом из трех ГДП, полученные как суммы векторов этих растяжений для треугольников сети полигона, будут примерно совпадать по направлениям, т.е. растягиваться вдоль береговой линии Камчатки, а сжиматься (или минимально растягиваться) перпендикулярно к ней. Выполненные по формулам (1) – (5) расчеты представлены в таблице 1. Результирующие значения векторов получены по правилу сложения векторных величин на плоскости.

Таблица 1

Значения максимального *E1* и минимального *E2* растяжений и их направлений на Камчатских ГДП

№ Δсети	Значения *E*1, *E*2 в единицах 10^{-6} и φ_{E1} в градусах*								
	Шипунский ГДП			Карымский ГДП			Петропавловский ГДП		
	*E*1	*E*2	φ_{E1}	*E*1	*E*2	φ_{E1}	*E*1	*E*2	φ_{E1}
1	3,5	–6,19	81,3	7	–8,29	14,7	2,93	0,53	–16,66
2	5,26	–4,7	95,84	5,16	–4,83	–15,83	1,67	–1,78	22,57
3	5,69	–1,62	51,17	4,11	–8,07	25,87	9,31	0,15	–23,24
3	0,72	–6,17	129,66	7,75	–2,53	56,22	1,79	0,31	90,77
4	3,6	–2,86	87,3	10,14	–1,06	46,16	0,95	–2,16	45,5
5	1,79	–2,33	0,03	18,38	–0,88	52,71	0,76	–1,76	53,81
6	3,55	–1,91	23,93	–0,08	–2,33	55,23	2,26	–1,77	70,08
7	4,33	–3,51	88,51	8,24	–1,39	102,48	7,97	1,26	–22,27
8	7,51	1,32	45,48	9,98	–0,81	0,97	4,01	–0,56	17,44
9	2,12	1,14	–33,08	11,09	6,86	–27,36	5,11	–0,75	29,43
10	0,16	–6,47	–40,74	6,83	–1,41	109,94	1,17	–1,35	58,67
11	7,94	–0,05	47	11,04	2,45	31,65	2,64	–0,1	24,98
12	4,15	–3,85	54,72	5,17	–0,92	103,53	1,58	–1,95	–3,98
13	5,69	1,97	–38,58	7,04	0,55	133,79	2,38	–0,99	–25,3
14	3,2	–11,1	89,93	13,41	0,33	128,38	4,46	–0,11	38,14
15	4,45	–12,18	61,67	3,92	0,65	123,23	3,43	–2,31	37,72
16	6,49	1,11	–0,14	14,6	3,32	61,59	2,31	–0,87	122,61
17	10,03	0,96	15,33	19	14,04	–5,82	2,05	0,37	–43,02
18	5,36	1,07	–8,48	14,99	6,5	94,32	1,92	0,08	–35,74
19	5,11	1,37	–6,1	21,11	12,81	18,84	2,07	0,13	57,39
20	8,29	3,39	–7,18				0,98	–1,55	–40,47
21	5,28	–2,46	109,19				0,84	–1,69	16,83
22	4,08	–2,11	105,69				0,82	0,03	83,64
23	0,3	–3,78	–42,6				2,36	0,33	–12,81
24	11,85	–2,9	–16,04				1,21	–0,39	59,61
25							3,62	–15,89	13,57
26							4,06	–0,57	–43,61
Результирующий вектор	***86,5***	***47,7***	φ_{E1}= ***32*** φ_{E2} = ***351***	***137,0***	***10,8***	φ_{E1}= ***48*** φ_{E2} = ***80***	***57,8***	***30,1***	φ_{E1}= ***8*** φ_{E2} = ***294***

* в каждом треугольнике сети ГДП φ_{E1}= (φ_{E1} + 90º).

Результирующие значения *E*1 и *E*2 с учетом их направлений для каждого исследуемого ГДП показаны на рисунке 1. Как отмечалось выше, в соответствии с теорией деформации направления максимального и минимального растяжений должны отличаться между собой на 90 градусов. По данному критерию мы получили существенные, хотя и ожидаемые расхождения, объясняемые прежде всего тем, что земная кора в пределах территории полигона не может быть однородна, тогда как формулы (1) – (5) рассчитаны на однородные деформации. Тем не менее нельзя не признать, что направления максимального и минимального растяжений, представленные на рисунке 1, между полигонами все же согласуются и в определенной степени подтверждают наше предположение о связи деформаций земной коры на восточном побережье Камчатки с моделью тектоники плит и непрерывного расширения океанического дна.

Гипотеза тектоники плит и палеомагнитные данные. Известно, что палеомагнетизм – это свойство горных пород намагничиваться в период своего формирования под действием магнитного поля Земли и сохранять приобретенную намагниченность в последующие эпохи. Поэтому по ориентации остаточной намагниченности породы исследователи палеомагнетизма могут определить ориентацию палеомагнитного поля в момент ее образования. Магнитное поле Земли описывается дипольной моделью, т.е. имеющей два полюса. Географические координаты этих полюсов для определенной эпохи можно вычислить по палеомагнитным данным [3, с. 47 – 48]. В результате получают так называемый палеомаг-

нитный полюс на эту эпоху. Измерения намагниченности пород, имеющих разный возраст, позволяют определить координаты палеомагнитного полюса в функции времени.

К настоящему времени выполнено огромное количество палеомагнитных измерений, анализ которых был, в частности, направлен и на проверку глобальных тектонических моделей. Так, по результатам этих измерений, относящихся к одному и тому же геологическому периоду, были вычислены положения палеомагнитного полюса для континентов, которые дали первое количественное подтверждение гипотезы тектоники плит. Действительно, если бы континентальные плиты в прошлом не испытывали относительные перемещения, то все измерения на них, относящиеся к одному и тому же периоду, должны были бы дать совпадающие координаты палеомагнитного полюса. На самом деле этого не происходит, и миграция магнитных полюсов Земли наблюдается не только как функция времени, за которое принимается геологический период, но и от континента к континенту. Последний вывод исследователи геодинамических явлений объясняют фактом относительного перемещения континентов, свидетельствующего в пользу гипотезы тектоники плит.

Большой объем научной информации получен также по результатам магнитометрических измерений. С помощью магнитометров, установленных на кораблях, были выполнены магнитные съемки океанических областей, на основании которых для них составлены карты магнитных аномалий. По ширине полос этих аномалий оказалось возможным определить скорость спрединга (расширения океанической плиты вблизи срединных океанических хребтов), которая для разных плит может доходить до 100 мм/год. Карты магнитных аномалий позволили также установить возраст пород значительной части океанического дна, подтвержденный данными глубоководного бурения.

Перечисленные свидетельства палеомагнитных данных в пользу гипотезы тектоники плит дали толчок к развитию исследований в этом направлении. Так, в [3, с. 59 – 62] изложена методика определения относительных перемещений плит, основанная на предположении совпадения скоростей раздвигания океанического дна у океанических хребтов и субдукции (поглощения) дна у океанических желобов и теореме Эйлера. Согласно этой теореме любую «прямую» (т.е. отрезок дуги большого круга), проведенную на сфере, можно перевести в любое другое наперед заданное положение и ориентацию на этой сфере путем поворота на некоторый угол вокруг соответствующим образом выбранной оси, проходящей через центр сферы. В приложении к движению жестких тектонических плит теорема означает, что плита может быть передвинута по сфере в любое новое положение посредством некоторого вращения вокруг оси, однозначно определяемой исходным и конечным положениями плиты. Точка пересечения такой оси с поверхностью Земли называется полюсом вращения. Это иллюстрирует рисунок 2, на котором показана плита ***B***, вращающаяся относительно плиты ***A*** против часовой стрелки.

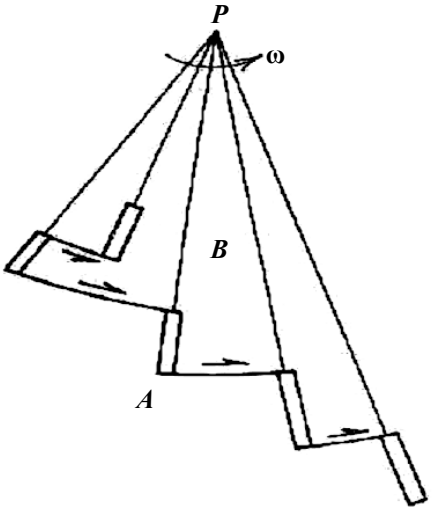


Рис. 2. Движение плиты ***B*** относительно плиты ***A*** в направлении против часовой стрелки.
Движение можно рассматривать как вращение с угловой скоростью **ω** относительно полюса вращения ***P***.
Сдвоенные линии – отрезки хребта. Стрелками показано направление движения на трансформных разломах

Отдельные сегменты срединно-океанического хребта лежат на «меридианах», проходящих через полюс вращения ***P***, а трансформные разломы (крупные поперечные разломы земной коры, рассекающие срединно-океанические хребты) – на «параллелях» с центром в полюсе вращения.

Относительные движения двух смежных плит полностью определяются координатами (широта и долгота) полюса вращения ***P*** и угловой скоростью вращения ω. Положение полюса вращения находится по данным магнитных измерений, т.е. по ориентации гребней хребтов, полосовых магнитных аномалий и трансформных разломов. Угловую скорость вращения можно вычислить, исходя из скоростей спрединга, определенных по ширине полосовых магнитных аномалий, и из условия сохранения площади поверхности. В соответствии с этим в [4] определены широта и долгота полюсов вращения для относительного движения десяти плит и угловые скорости вращения, из которых мы приведем здесь данные только для нашего случая: Евразиатской и Тихоокеанской плит (табл. 2).

Таблица 2

Положения полюса вращения и угловые скорости
относительного движения смежных поверхностных плит*

Плиты	Координаты полюса вращения ***P***		ω град/млн.лет
	широта, град. с. ш.	долгота, град в.д.	
Евразиатская – Тихоокеанская	60,6	-78,9	0,98

*Первая из упомянутых плит вращается по отношению ко второй против часовой стрелки.

Согласно теореме Эйлера для любой произвольной точки ***N***, расположенной у границы плит, можно определить скорость ***u*** их относительного движения по формуле:

$$u = \omega R \sin\Delta, \tag{6}$$

где R – радиус Земли; Δ – угловая мера дуги большого круга между полюсом вращения ***P*** и выбранной точкой ***N*** на границе между плитами с известными координатами.

Величина Δ определяется через известные координаты точек ***P*** и ***N*** согласно формулам сферической геометрии. Если кошироту и восточную долготу этих двух точек обозначить соответственно через (θ_P, ψ_P) и (θ_N, ψ_N), то можно записать:

$$\cos\Delta = \cos\theta_P \cos\theta_N + \sin\theta_P \sin\theta_N \cos(\psi_P - \psi_N). \tag{7}$$

По данным таблицы 2 и формулам (6), (7) нами были определены относительные скорости движения Евроазиатской и Тихоокеанской плит для точек, отнесенных к центрам Карымского, Шипунского и Петропавловского ГДП, а также к поселку Тиличики, где 20 апреля 2006 года произошло сильное землетрясение. Координаты указанных точек были сняты с топографической карты. Результаты вычислений приведены в таблице 3.

Таблица 3

Скорости относительного движения Евразиатской и Тихоокеанской плит
для различных точек восточного побережья полуострова Камчатка (граница плит)

Название пункта	Координаты выбранных точек		Координаты полюса вращения		Угловая скорость ω, град/млн. лет	Скорость *u*, мм/год
	кошировта θ_N, град	долгота ψ_N, град	кошировта θ_P, град	долгота Ψ_P, град		
Евразийская – Тихоокеанская						
Карымский ГДП	36,0	159,5	29,4	–78,9	0,98	90,8
Шипунский ГДП	36,6	159,6	29,4	–78,9	0,98	91,3
Петропавловский ГДП	36,7	158,9	29,4	–78,9	0,98	91,6
Поселок Тиличики	29,6	166,1	29,4	–78,9	0,98	82,4

Определение взаимных перемещений соседних плит по данным космических измерений. Известно, что при изучении глобальных геодинамических явлений, к которым относятся движения тектонических плит, геодезия смогла оказаться полезной благодаря развитию ее космических методов. В последние десятилетия геодинамические исследования с применением космических технологий ведутся по международным и национальным геодинамическим программам, в которых активно работают США, за-

падноевропейские страны, Япония, Китай, Россия, Киргизия и др. Здесь прежде всего следует отметить программы Международной геодинамической службы (International Geodynamic Servise – IGS). Благодаря работе IGS в период 1978 – 1990 годов построены две глобальные сети по наблюдениям ИСЗ Lageos (22 обсерватории) и квазаров (88 обсерваторий), наблюдения в которых выполнялись в течение 13 лет методами РСДБ и лазерной локации [5, 6], а в 1993 – 1996 годах по программе IGS была создана глобальная сеть из 114 обсерваторий, расположенных на шести материках (Австралия – 4; Антарктида – 4; Африка – 5; Евразия – 39; Северная Америка – 32; Южная Америка – 8) и на 22 островах в Мировом океане. Глобальная сеть Международной геодинамической службы (Global Net International Geodinamic Servise – GNIGS) составлена в основном из лазерных и радиоинтерферометрических обсерваторий [7], входящих в упомянутые геодинамические сети 1978 – 1990 годов. Измерение хорд в этих сетях выполнено с относительной ошибкой $10^{-8}\ldots10^{-9}$.

Результаты анализа данных РСДБ-наблюдений геодинамической сети 1978 – 1990 годов даны в работе [8], которые свидетельствуют о движении в противоположные стороны Северо-Американского континента и Западной Европы с относительной скоростью 45 мм/год и о движении центральной части Тихоокеанской плиты в запад-северо-западном направлении со скоростью более 75 мм/год, что в целом согласуется с гипотезой тектоники плит, а также данными, полученными нами в предыдущих разделах для Камчатских ГДП.

Заключение. Приведенный анализ результатов наземных геодезических измерений для трех Камчатских геодинамических полигонов, выполненные для них расчеты по палеомагнитным данным и результаты космических измерений свидетельствуют в пользу гипотезы тектоники плит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Есиков, Н.П. Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности / Н.П. Есиков. – М.: Наука, 1979. – 152 с.
2. Шароглазова, Г.А. Применение геодезических методов в геодинамике / Г.А. Шароглазова. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 192 с.
3. Теркот, Д. Геодинамика: геологические приложения физики сплошных сред / Д. Теркот, Дж. Шуберт; пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – Ч. – 1374 с.
4. Cohee, G.V. Contributions to the Geologic Time Scale / G.V. Cohee, M.F. Glaessner, H.D. Hedberg // Studies in Geology, No. 6, Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1978.
5. Ryan, J.W. Crystal Dynamics Proect / J.W. Ryan, D.S. Caprette, C. Ma // VLBI Geodetic Results 1979 – 1990 // NASA Tecnical Memorandum. – 1992. – № 104552. – 391 p.
6. Tectonic Motion and Deformation from Satellite Laser Ranging to Lageos / D.E. Smith [et al.] // Jornal of Geophysical Research. – 1990. – Vol. 95. – NB13. – P. 22013 – 22041.
7. Mueller, I.I. The International GPS servise for geodinamics / I.I. Mueller // Rep. at First International Symposium on Deformation in Turkey. – Istanbul, 1995. – First book. – Sept. 5 – 9. – P. 47.
8. Певнев, А.К. Об экспериментальной проверке тектоники литосферных плит и других геодинамических задач геодезии / А.К. Певнев // Геодезия и картография. – 1994. – № 6. – С. 23 – 31.

Поступила 14.09.2009