

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

УДК 551.24+551.243+550.342

СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА КАМЧАТКОМ И АШХАБАДСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ

Евгений Альбертович Фаттахов

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, 123242, Россия, г. Москва, ул. Большая Грузинская 10, стр. 1, младший научный сотрудник, тел. (499)254-65-65, e-mail: Fea@ifz.ru

Основная цель работы заключалась в проведении глубокого статистического анализа многолетних светодальномерных наблюдений на двух геодинамических полигонах, расположенных в сейсмоактивных регионах, но с различной кинематикой движения плит. Тектоника Камчатки представляет собой зону субдукции, а Ашхабад – зону коллизии Иранской и Туранской плит (передовой разлом Копетдага). Все расчеты проводились с помощью программы для обработки геофизических данных WinABD, которая обеспечивает полный цикл операций, необходимых при работе с экспериментальными временными рядами. Описаны характеристика и конфигурация светодальномерных линий, посчитаны тренды и определены среднегодовые скорости смещения на этих полигонах. Методом периодограммы наложенных эпох построены периоды, а также проведено сравнение полученных результатов между этими полигонами.

С учетом высокой сейсмичности и активных геодинамических процессов (по геологическим данным) среднегодовая скорость относительных деформаций на Камчатке изменяется в диапазоне от $8 \cdot 10^{-9}$ до $5 \cdot 10^{-8}$, а в Копетдаге – от $4 \cdot 10^{-9}$ до $3 \cdot 10^{-8}$.

Ключевые слова: геодинамический мониторинг, светодальномерные наблюдения, обработка геофизических данных, субдукция, зона коллизии, кинематика плит, периодограммы, программа для анализа временных рядов.

Введение

С 1979 г. на Камчатке длительное время проводились наземные светодальномерные наблюдения для измерения горизонтальной компоненты. С 2003 г. светодальномеры заменили на GPS-станции [1].

На Ашхабадском геодинамическом полигоне с 1965 и 1974 г. по настоящее время проводятся соответственно высотные и линейные измерения с целью исследования геодинамических процессов. Имея полувековые ряды вертикальных движений и 40-летние ряды горизонтальных движений, можно решать фундаментальную задачу – определять среднегодовые скорости региональных

геодинамических процессов. Региональные процессы носят как пространственный (блоки земной коры, литосферные плиты), так и временной характер, позволяя изучать такие процессы, как субдукция на Камчатке и коллизия Иранской и Туранской плит.

Характеристика наблюдений: светодальномерные наблюдения представляют собой веер линий, ориентированных в разные стороны, в центре находится лазерный излучатель света; на концах линий установлены отражатели, обеспечивающие процесс измерений. Измерение указанных расстояний дает информацию о горизонтальной составляющей деформационных процессов. Конфигурация измерительных линий на Камчатке и в Копетдаге представлена на рис. 1 и 2.

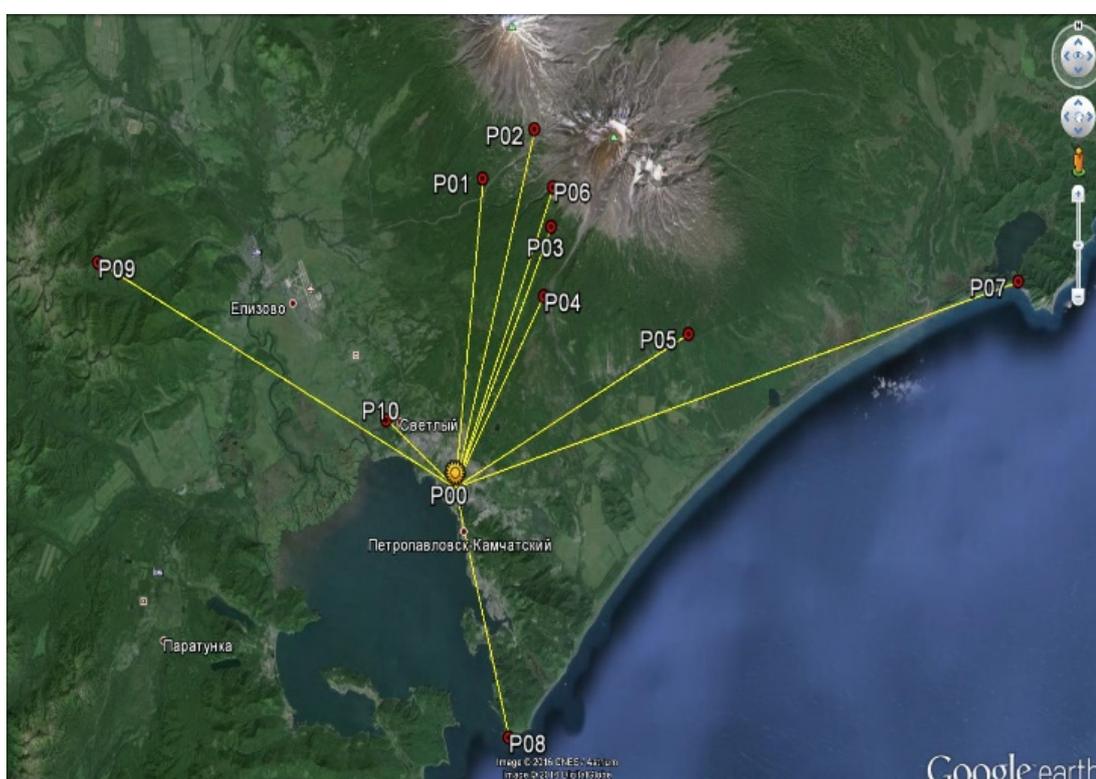


Рис. 1. Конфигурация светодальномерных линий на обсерватории Мишенная (Камчатка)

Первоначально накопленные ряды наблюдений исследовались в основном простыми методами обработки данных, например, корреляционным анализом, либо просто осреднением на разных интервалах времени и определением скоростей современных движений. В частности, группой Б. В. Левина были определены среднегодовые скорости смещения и относительных деформаций по линиям 1, 3, 5, 8 для Камчатки, а С. Ф. Изюмовым и Ю. О. Кузьминым были вычислены среднегодовые скорости деформационных процессов в Копетдагском регионе. С появлением современных методов и программ для спектраль-

но-временного анализа временных рядов, а также накоплением более длительных по времени данных (более 40 лет) стало возможно более детально подойти к оценке этих скоростей.

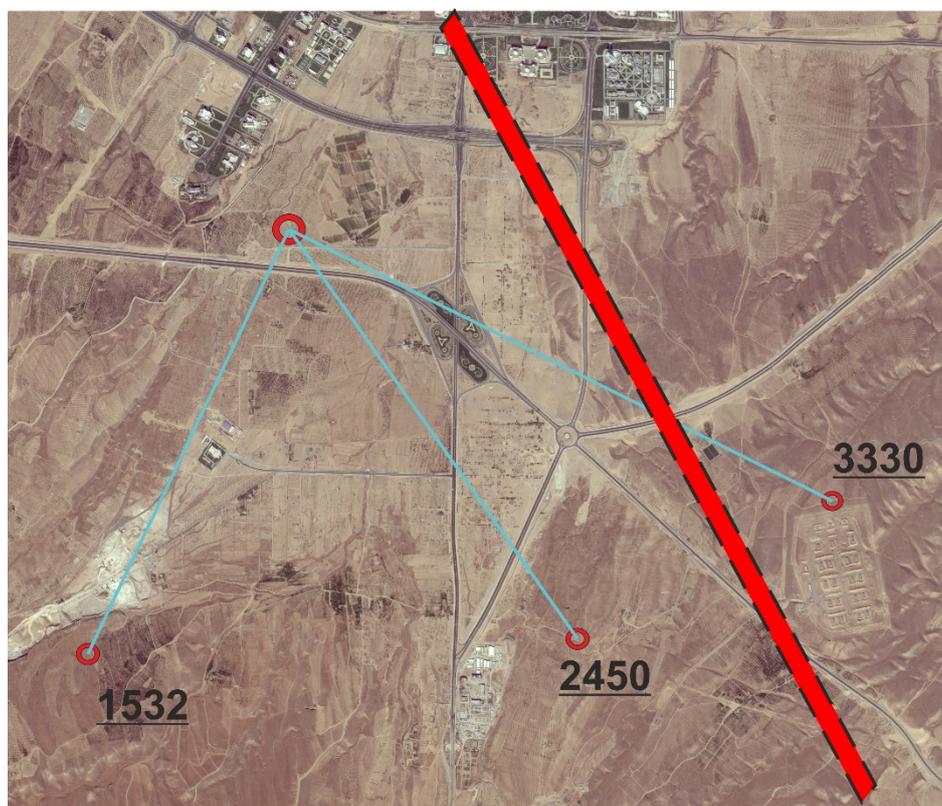


Рис. 2. Светодальномерные линии на Ашхабадском геодинамическом полигоне. Красной линией показано местоположение передового разлома Копетдага

Анализ светодальномерных линий на Камчатке

Одной из ключевых проблем в анализе геофизических временных рядов является наличие пропусков в самих данных. Это обусловлено выходом из строя оборудования, заменой источников питания, нестабильной погодой и др. При этом для различных методов обработки необходимо использовать именно непрерывные ряды наблюдений.

Данное исследование было проведено с помощью программы WinABD, специально разработанной для анализа временных рядов геофизических данных в Институте физики Земли РАН. В отличие от многих пакетов статистического анализа, WinABD обеспечивает полный цикл операций, необходимых при работе с экспериментальными временными рядами. В состав пакета входит система управления базой данных, мощный исследовательский комплекс и интерактивная среда визуализации данных. Программа позволяет анализировать

структуру рядов, выявлять зависимости и взаимосвязи между сигналами. Имеется большое количество нестандартных инструментов и методов, необходимых в повседневной работе с неидеальными данными. Использование скользящего временного окна дает возможность изучить развитие всех процессов во времени и выявлять изменения, связанные с какими-либо событиями. Все программные процедуры допускают учет пропусков в наблюдениях. Заполнение пропусков проводилось с помощью скользящего среднего (ядерное сглаживание). При этом ширина окна гауссианы была равна 48 месяцам [2–4].

На рис. 3 показаны обработанные ряды наблюдений на Камчатке. Мониторинг проводился с 1979 по 2003 г. по 10 направлениям. В зависимости от задач, отражатели были расположены в прибрежной зоне, возле вулканов, а один отражатель был удален от зоны субдукции на 50 километров. Вводились необходимые поправки за температуру и давление. Измерения проводились с частотой опроса несколько раз в месяц, но из-за нестабильности покрытия ряда данные были усреднены ежемесячно.

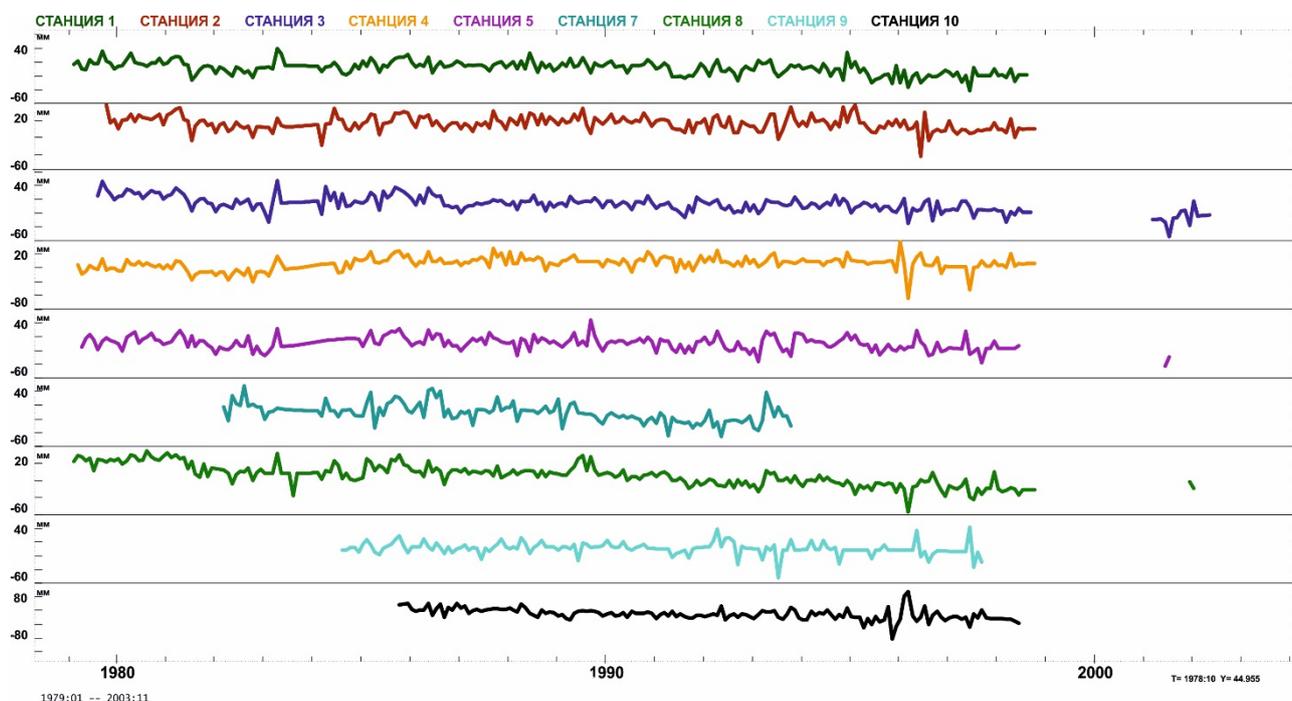


Рис. 3. Модифицированные ряды светодальномерных данных на Камчатке

Характеристика вычисленных трендов приведена в табл. 1. Для оценки скоростей деформации были выбраны периоды, в которых отсутствовали длительные пропуски. Из всех 10 линий только 2 линии (4 и 5) имеют положительный тренд (удлинение), все остальные – отрицательный (укорочение). Скорость относительных деформаций в год изменяется в диапазоне от $8 \cdot 10^{-9}$ до $5 \cdot 10^{-8}$.

Если учесть, что амплитуда земного прилива волны M_2 для широты Камчатки составляет примерно $3 \cdot 10^{-8}$, то получается, что среднегодовая скорость

деформаций в таком сейсмоактивном регионе соизмерима с амплитудой земного прилива. При этом среднегодовые скорости деформаций, полученные по данным повторного нивелирования с повышенной пространственно-временной детальностью в зонах разломов, указывают на высокий уровень скоростей локальных деформаций, достигающих 10^{-4} в год [5, 6].

Таблица 1

Линия	Период	Скорость деформации в год
1	02.1979 – 07.1998	$0,8 \cdot 10^{-8}$
2	10.1979 – 09.1998	$3 \cdot 10^{-8}$
3	08.1979 – 08.1998	$1 \cdot 10^{-8}$
4	03.1979 – 09.1998	$4 \cdot 10^{-8}$
5	04.1979 – 05.1998	$1 \cdot 10^{-8}$
7	03.1982 – 08.1993	$2 \cdot 10^{-8}$
8	02.1979 – 09.1998	$1,7 \cdot 10^{-8}$
9	08.1984 – 08.1997	$5 \cdot 10^{-8}$
10	10.1985 – 05.1998	$2 \cdot 10^{-8}$

*Анализ светодальномерных линий
на Аихабадском геодинамическом полигоне*

Система светодальномерных наблюдений была построена таким образом, чтобы иметь одну линию (1532), ориентированную в субмеридиональном направлении, вторую линию (3330) – субширотную, пересекающую зону Передового разлома Копетдага и промежуточную линию 2450, которая параллельна зоне простирания разлома. Данная система позволяет контролировать динамику бортов разлома и процессы, происходящие в блоковой части [7, 8]. Название 3330 соответствует длине линии в километрах. Измерения велись два раза в сутки, утром и вечером, затем высчитывалось среднее значение. Чтобы убрать пропуски, ряд был усреднен помесечно. Таким образом, достигалось равномерное покрытие ряда (рис. 4).

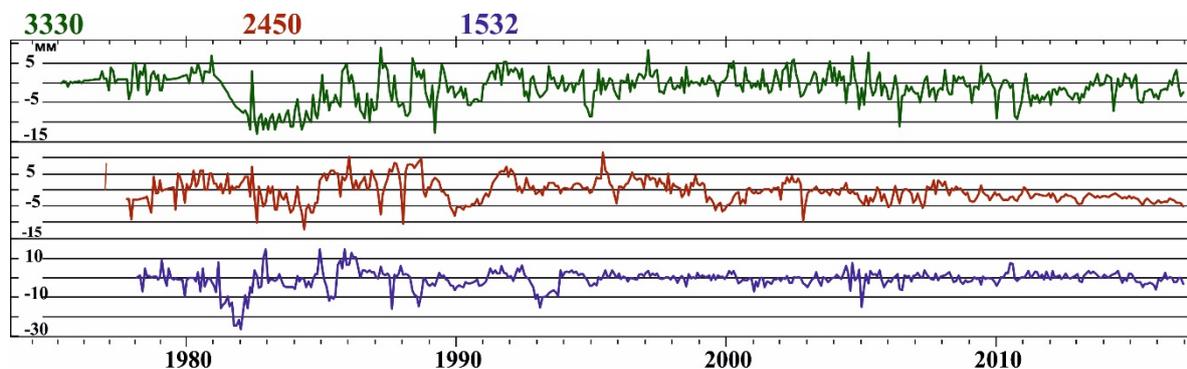


Рис. 4. Смещения по светодальномерным линиям 3330, 2450 и 1532

Ряды наблюдений в Ашхабаде более представительны, чем на Камчатке. Связано это с тем, что метеоусловия в Копетдаге стабильнее. А для лазерного луча важное значение имеют метеоусловия на трассе прохождения в приземных слоях атмосферы.

На рис. 4 видно, что кривые смещений имеют разнонаправленный характер, отсутствует преобладание укорочения или растяжения. Линейный тренд, вычисленный по 5-летним интервалам светодальномерных наблюдений (рис. 5), подтверждает правосторонний сдвиг Передового разлома, но по сравнению с геологическими и GPS-данными скорость деформаций на несколько порядков меньше (табл. 2).

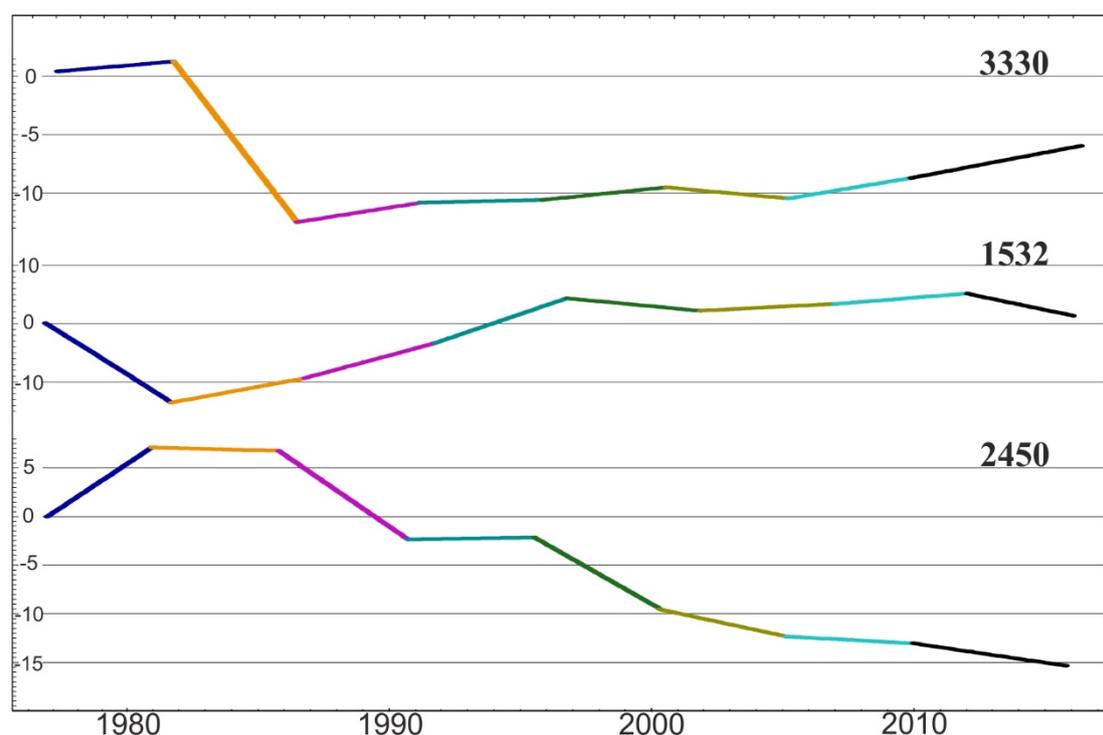


Рис. 5. Накопленный линейный тренд, вычисленный по 5-летним интервалам наблюдений

Таблица 2

Линия	Период	Скорость деформаций в год
3330	05.1975 – 12.2016	$0,4 \cdot 10^{-8}$
2450	10.1977 – 12.2016	$3 \cdot 10^{-8}$
1532	03.1978 – 12.2016	$2 \cdot 10^{-8}$

Анализ трендов показал, что среднегодовые скорости горизонтальных движений земной поверхности меньше амплитуды земного прилива (амплитуда земного прилива для Ашхабада $2 \cdot 10^{-8}$). Скорости смещения в Копетдагском регионе изменяются в диапазоне от 0,015 до 0,08 мм/год.

В итоге получается очень активный регион, очаговая зона катастрофического Ашхабадского землетрясения 1948 г., где все разломы хорошо изучены. Повторные нивелирные наблюдения показывают, что в зонах разломов идут активные процессы с высокими амплитудами и скоростями относительных деформаций на уровне 10^{-5} год, в то время как региональный фон скорости деформаций крайне низок. При этом данные по среднегодовым скоростям получены уже строгими статистическими методами за большой период наблюдений. Исследования же зарубежных авторов показывают, что по геологическим и GPS-данным среднегодовая скорость смещения по разлому составляет от 10 до 16 мм [9, 10].

Кроме того, на территории Ашхабада существуют и другие системы геодинимических наблюдений, на которых одновременно проводятся светодальнономерные и нивелирные (профили длиной в 50 километров и более) измерения [11, 12]. При совокупном анализе светодальнономерных линий оказалось, что среднегодовая скорость деформаций на границе тектонических плит, как и на Камчатке, находится на уровне 1,5–2 амплитуд земного прилива волны M_2 для широты Ашхабада. А деформации внутри разломной зоны на два порядка больше [13, 14].

Сравнение периодограмм на полигонах

Наличие таких сложных по морфологии временных рядов как на Камчатке, так и в Копетдаге привело к необходимости проанализировать и сравнивать периодичности движений. Для решения этой задачи подходят два метода – периодограммы наложенных эпох и расчет спектров Фурье.

Исследования различных авторов показывают, что выявление и исследование таких периодичностей средствами Фурье-анализа не всегда оптимально, поскольку базовая модель гармонического анализа, основанная на суперпозиции синусоид, не вполне адекватна реальным вариациям, так как многие природные процессы существенно отличаются от синусоидальной кривой. Альтернативу могут составить методы, в которых построение периодического компонента проводится способом наложения эпох. Методы, основанные на этой идее, позволяют не только исследовать свойства периодического компонента сигнала, но и выявлять периоды колебаний путем построения периодограмм наложенных эпох. Преимущество метода периодограмм также состоит в его нечувствительности к наличию перерывов и пропусков в наблюдениях [15–17].

На рис. 6 показаны результаты периодограммного анализа для Камчатки по 9 линиям.

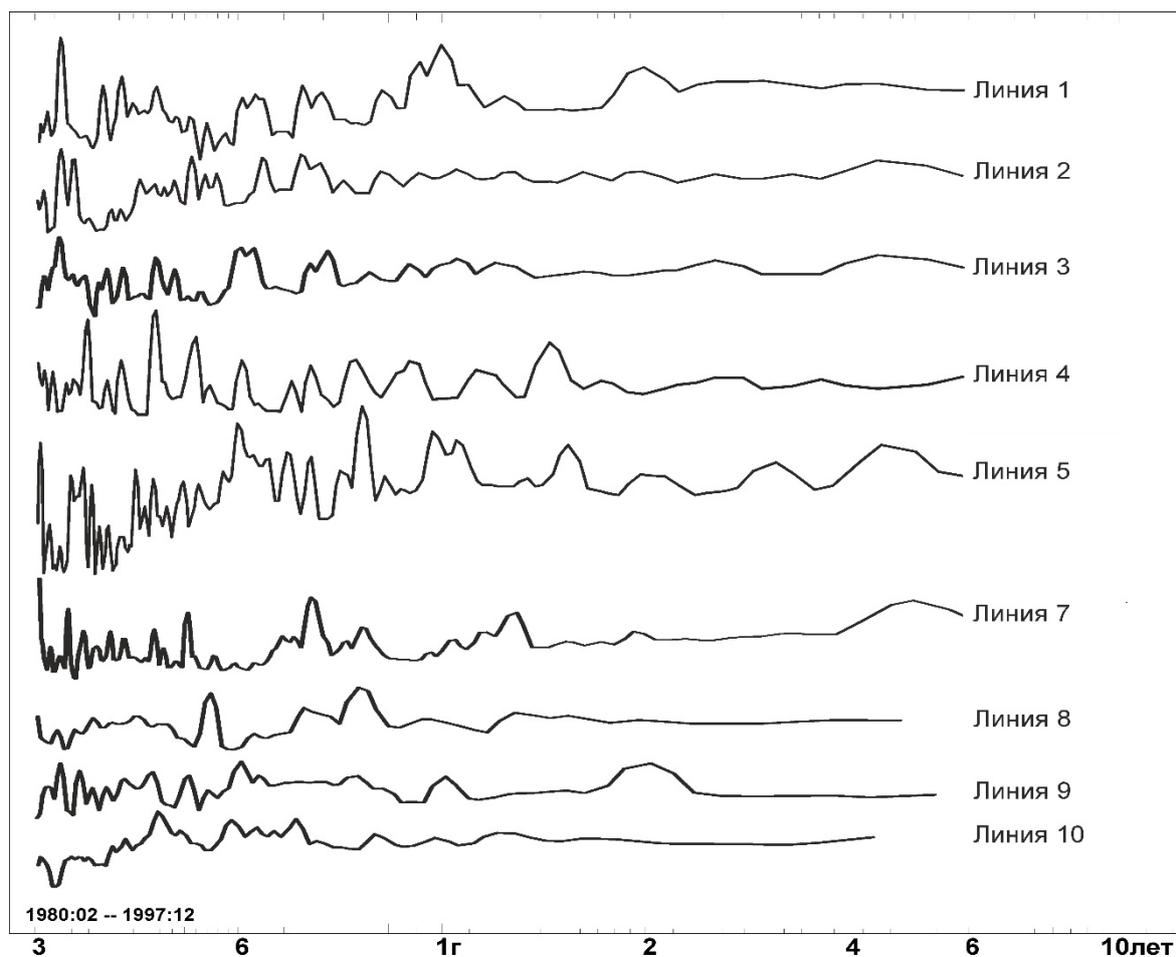


Рис. 6. Результаты периодограммного анализа на Камчатке

Несмотря на то, что линии направлены в разные стороны, выделить одинаковые периоды оказалось затруднительно. Однако, тем не менее, прослеживаются периоды, близкие 1 году (сезонный ход), 5 и 6 месяцев. Они оказались наиболее устойчивы по всем линиям. Существуют периоды и большие, и меньшие, но они не сильно коррелируют друг с другом.

Для выявления общих периодов, периодограммы были сопоставлены друг с другом в направлении север-юг (1532 и 1) и восток-запад (3330 и 9).

Целью сопоставления был поиск общих закономерностей и периодов в азимутальном и широтном направлениях. Это может быть связано с метеоусловиями, поскольку системы наблюдений очень далеко разнесены, и трудно полагать, что периодичности есть единый геодинамический процесс, но могут быть единые причины сезонного характера, которые являются общими для атмосферы и могут одинаково отразиться в светодальномерных наблюдениях в Копетдаге и на Камчатке.

На рис. 7 представлены периодограммы вдоль этих линий. Видно, что однозначно совпадающих периодов практически нет. Если в широтном направлении для Камчатки достаточно хорошо выделяется один год, то в Ашхабаде это

примерно 10 месяцев. Это совершенно четкое сезонное явление, поскольку в климатических условиях Ашхабада, когда 9-10 месяцев лето и весна и практически нет зимы, тепловые деформации земной поверхности, изменения атмосферного давления, прозрачности атмосферы, которая очень сильно зависит от температуры, приводят к тому, что максимум кривых приходится на период в 10 месяцев. На Камчатке это, в первую очередь, сезонная периодичность. Кроме того, существуют совпадения на коротких периодах на уровне 3-4 месяца, но для того, чтобы это идентифицировать, необходимы дальнейшие исследования. Однако, понятно, что для Ашхабада, где достаточно однородны атмосферные условия, подобный период связан с малым количеством осадков, а климат резко континентальный, и переход от условной зимы к лету происходит в течение первых месяцев. На Камчатке этот переход более плавный, там очень много различных циклонов, которые сильно искажают атмосферные условия прохождения лазерного луча, поэтому там много периодов, которые трудно адекватно идентифицировать.

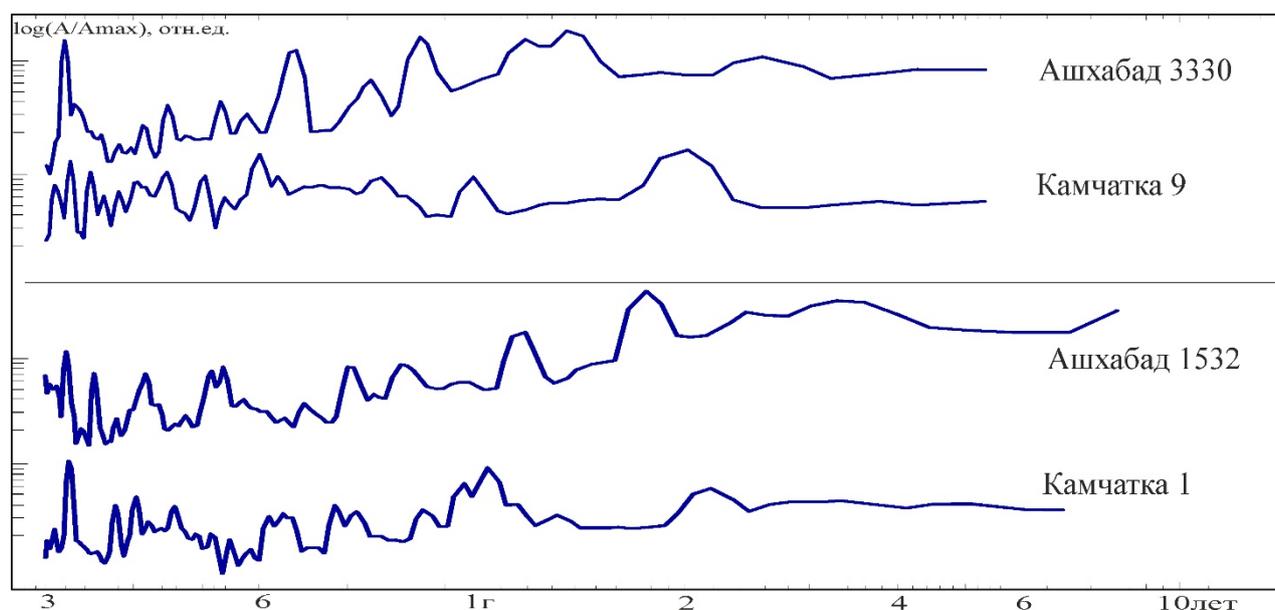


Рис. 7. Сравнение периодограмм в Ашхабаде и на Камчатке в широтном и субмеридиональном направлении

Анализ данных в субмеридиональном направлении показал, что на Камчатке преобладает период в один год, в Ашхабаде те же самые 9-10 месяцев, а период больше года связан с потоками ветра из песков Каракумов именно в направлении север-юг. Эти потоки имеют характер периодичности 8-10 месяцев. Кроме того, присутствуют возвратные явления, когда с Ирана через горы Копетдаг проходит ветер, меняющий атмосферные явления. Период колебаний данного ветра примерно 1 год и 2-3 месяца. Вновь видно, что за исключением периода 7 месяцев совпадений практически нет. Возможно, что данный период

в 7-8 месяцев как раз и связан с особенностью атмосферы, которая распространена повсеместно. Таким образом, очевидно, что практически нет совпадающих, кроме сезонных факторов, периодичностей. А в этом случае среднегодовые скорости деформаций земной поверхности, которые определены по трендовому анализу, являются именно региональными характеристиками геодинамического процесса.

Спектрально-временной анализ, помимо фундаментальной задачи в определении среднегодовой скорости региональных процессов, имеет и прикладной аспект. В настоящее время созданы многочисленные системы геодинамического мониторинга на месторождениях нефти и газа [18–22] и твердых полезных ископаемых [23] с целью обеспечения промышленной безопасности на данных объектах. Кроме того, совокупность светодальномерных линий может быть преобразована в тензометрическую розетку, по которой вычисляются инвариантные характеристики деформационного процесса на основе геометрической теории деформаций [24, 25].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Современные движения земной коры (СДЗК) на Камчатке / В. Е. Левин, В. Ф. Бахтияров, Н. Н. Титков и др. // *Физика Земли*. – 2014. – С. 17–37.
2. Технологии анализа геофизических временных рядов. Ч. 1. Требования к программе обработки / А. В. Дещеревский, В. И. Журавлев, А. Н. Никольский и др. // *Сейсмические приборы*. – 2016. – Т. 52. – № 1. – С. 61–82.
3. Технологии анализа геофизических временных рядов. Часть 2. WINABD – пакет программ для сопровождения и анализа данных геофизического мониторинга / А. В. Дещеревский, В. И. Журавлев, А. Н. Никольский и др. // *Сейсмические приборы*. – 2016. – Т. 52. – № 3. – С. 50–80.
4. Проблемы анализа временных рядов с пропусками и методы их решения в программе WINABD / А. В. Дещеревский, В. И. Журавлев, А. Н. Никольский и др. // *Геофизические процессы и биосфера*. – 2016. – Т. 15. – № 3. – С. 5–34.
5. Кузьмин Ю. О., Чуриков В. А. Механизм формирования аномальных деформационных процессов в период подготовки Камчатского землетрясения 2 марта 1992 г. // *Вулканология и сейсмология*. – 1998. – № 6. – С. 37–50.
6. Churikov V. A., Kuzmin Yu. O. Relation between deformation and seismicity in the active fault zone of Kamchatka, Russia // *Geophysical Journal International*. – 1998. – Vol. 133, No. 3. – P. 607–615.
7. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломов и парадоксы скоростей деформаций // *Физика Земли*. – 2013. – № 5. – С. 28–46.
8. Изюмов С. Ф., Кузьмин Ю. О. Исследование современных геодинамических процессов в Копетдагском регионе // *Физика Земли*. – 2014. – № 6. – С. 3.
9. Allen M., Jackson J., Walker R. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates // *TECTONICS*. – 2004. – Vol. 23, TC2008. doi:10.1029/2003TC001530.
10. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman / Ph. Vernant, F. Nilforoushan, D. Hatzfeld, M. R. Abbassi, C. Vigny, F. Masson, H. Nankali, J. Martinod, A. Ashtiani, R. Bayer, F. Tavakoli, J. Chery // *Geophys. J. Int.* – 2004. – Vol. 157. – P. 381–398.

11. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика системы разломов // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 25–30.
12. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика опасных разломов // Физика Земли. – 2016. – № 5. – С. 87–101.
13. Кузьмин Ю. О. Тектонофизика и современная геодинамика // Физика Земли. – 2009. – № 11. – С. 44–60.
14. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2014. – Т. 5. – № 2. – С. 401–443.
15. Серебренников М. Г., Первозванский А. А. Выявление скрытых периодичностей. – М. : Наука, 1965. – 244 с.
16. Теребиж В. Ю. Анализ временных рядов в астрофизике. – М. : Наука, 1992. – 392 с.
17. Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Сравнение периодограмм наложенных эпох и спектров Фурье экспериментальных рядов // Сейсмические приборы. – 2011. – Т. 47, № 3. – С. 44–70.
18. Маркшейдерия : учебник для вузов // под ред. М. Е. Певзнера, В. Н. Попова. – М. : МГГУ, 2003. – 419 с.
19. Кузьмин Ю. О. Проблемные вопросы изучения деформационных процессов в современной геодинамике // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 3. – С. 98–107.
20. Грунин А. Г., Кузьмин Ю. О., Фаттахов Е. А. Проблемные вопросы проектирования геодинамических полигонов на месторождениях УВ // Маркшейдерский вестник. – 2014. – № 6. – С. 24–31.
21. Кузьмин Ю. О. Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике // Физика Земли. – 2014. – № 5. – С. 51–64.
22. Кузьмин Ю. О., Фаттахов Е. А. Анализ деформации земной поверхности на Степновском подземном хранилище газа // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» : материалы докладов всероссийской конференции с международным участием. – 2016. – С. 102–107.
23. Геодезическое обеспечение геодинамического мониторинга объектов / А. А. Панжин, А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина, Б. Т. Мазуров // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 26–39.
24. Кузьмин Ю. О., Фаттахов Е. А. Тензометрический метод анализа результатов наблюдений на геодинамических полигонах // Маркшейдерский вестник. – 2016. – № 5. – С. 22–25.
25. Изюмов С. Ф., Кузьмин Ю. О., Фаттахов Е. А. Анализ светодальномерных наблюдений в Копетдагском регионе методами тензометрии // «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе» : материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике. – 2016. – С. 16–18.

Получено 06.09.2017

© Е. А. Фаттахов, 2017

SPECTRAL-TEMPORAL ANALYSIS OF LASER RANGEFINDER OBSERVATIONS ON THE KAMCHATSKY AND ASHGABAD GEODYNAMIC POLYGONS

Yevgeny A. Fattakhov

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 123242, Russia, Moscow, 10 Bolshaya Gruzinskaya St., Build. 1, Junior Researcher, phone: (499)254-65-65, e-mail: Fea@ifz.ru

The main goal of the work was to perform a deep statistical analysis of the long-term laser rangefinder observations at two geodynamic polygons located in seismically active regions, but with different kinematics of plate movement. Tectonics of Kamchatka is a subduction zone, Ashgabat is a zone of collision of the Iranian and Turanian plates (advanced the fault of the Kopetdag). All calculations were carried out using programs for processing geophysical data WinABD, which provides a full cycle of operations necessary for working with experimental temporary series. The characteristics and configuration of the laser rangefinder lines are described, the trends are calculated and the average annual displacement rates at these polygons are determined. Periods of superimposed epochs are used to construct periods, as well as a comparison of the results obtained between these polygons.

Considering high seismicity and active geodynamic processes (according to geological data), average annual speed relative deformations on Kamchatka changes in the range from $8 \cdot 10^{-9}$ to $5 \cdot 10^{-8}$, and in Kopetdag from $4 \cdot 10^{-9}$ to $3 \cdot 10^{-8}$.

Key words: geodynamic monitoring, laser rangefinder observations, geophysical data processing, subduction, collision zone, kinematics of plates, periodograms, program for temporary series analysis.

REFERENCES

1. Levin, V. E., Bakhtiarov, V. F., Titkov, N. N., Serovetnikov, S. S., Magus'kin, M. A., & Lander, A. V. (2014). Contemporary crustal movements (CCMs) in Kamchatka. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(6), 732–751.
2. Desherevskii, A. V., Zhuravlev, V. I., Nikolsky, A. N., & Sidorin, A. Ya. (2016). Technologies for analysis of geophysical time series. Part 1. Requirements for software. *Seismic Instruments*, 52(1), 61–82 [in Russian].
3. Desherevskii, A. V., Zhuravlev, V. I., Nikolsky, A. N., & Sidorin, A. Ya. (2016). Technologies for analysis of geophysical time series. Part 2. WinABD - a software package for maintenance and data analysis of geophysical monitoring. *Seismic Instruments*, 52(3), 50–80 [in Russian].
4. Desherevskii, A. V., Zhuravlev, V. I., Nikolsky, A. N., & Sidorin, A. Ya. (2016). Problems in analysis of time series with gaps and their solutions in WinABD software package. *Geophysical Processes and Biosphere*, 15(3), 5–34 [in Russian].
5. Kuzmin, Yu. O., & Churikov, V. A. (1999). Anomalous strain generation mechanism before the march 2, Kamchatkan earthquake. *Journal of Volcanology and Seismology*, 20(6), 641–656.
6. Churikov, V. A., & Kuzmin, Yu. O. (1998). Relation between deformation and seismicity in the active fault zone of Kamchatka, Russia. *Geophysical Journal International*, 133(3), 607–615.
7. Kuzmin, Yu. O. (2013). Recent geodynamics of faults and paradoxes of the rates of deformation. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 49(5), 626–642.
8. Izyumov, S. F. & Kuzmin, Yu. O. (2014). Study of the recent geodynamic processes in the Kopet-Dag region. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(6), 719–731.
9. Allen, M., Jackson J., & Walker, R. (2004). Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23. doi:10.1029/2003tc001530.

10. Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., ... Chery, J. (2004). Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys. J. Int.*, 157, 381–398.
11. Kuzmin, Yu. O. (2015). Recent geodynamics of a fault system. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 51(4), 480–485.
12. Kuzmin, Yu. O. (2016). Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 52(5), 709–722.
13. Kuzmin, Yu. O. (2009). Tectonophysics and recent geodynamics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 45(11), 973–986.
14. Kuzmin, Yu. O. (2014). Recent geodynamics of fault zones: faulting in real time scale. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(2), 401–443 [in Russian].
15. Serebrennikov, M. G., & Pervozvanskij, A. A. (1965). *Vyyavlenie skrytyh periodichnostej [Detection of hidden periodicities]*. Moscow: Nauka [in Russian].
16. Terebizh, V. Yu. (1992). *Analiz vremennyh ryadov v astrofizike [Time series analysis in astrophysics]*. Moscow: Nauka [in Russian].
17. Desherevskii, A. V., & Sidorin, A. Ya. (2011). Comparison of periodograms and Fourier spectra of experimental time series. *Seismic Instruments*, 47(3), 44–70 [in Russian].
18. Pevzner, M. E., & Popov, V. N. (Ed.). (2003). *Markshejderija [Mine Surveying]*. Moscow: MSMU [in Russian].
19. Kuzmin, Yu. O. (2008). Problematic issues of studying the deformation processes in recent geodynamics. *Gornij informacij-analyticheskij bulletin [Mountain Information and Analytical Bulletin]*, 3, 98–107 [in Russian].
20. Grunin, A. G., Kuzmin, Yu. O., & Fattakhov, E. A. (2014). Problematic issues of design of geodynamic grounds on UV fields. *Markshejderskij vestnik [Mine surveying Bulletin]*, 6, 24–31 [in Russian].
21. Kuzmin, Yu. O. (2014). The topical problems of identifying the results of the observations in recent geodynamics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(5), 641–654.
22. Kuzmin, Yu. O., & Fattakhov, E. A. (2016). Analysis of deformation of the earth's surface on stepnovskaya underground gas storage. In *Chetvertaja tektonofizicheskaja konferencija v IFZ RAN, Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle: materialy dokladov vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Proceedings of the Fourth Tectonophysical Conference in IPE RAS, Tectonophysics and Actual Problems of Earth Sciences]* (pp. 102–107). Moscow: IPE RAS [in Russian].
23. Panzhin, A. A., Sashourin, A. D., Panzhina, N. A., & Mazurov, B. T. (2016). Geodesic support of geodynamic monitoring of objects of subsurface use. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(34), 26–39 [in Russian].
24. Kuzmin, Yu. O., & Fattakhov, E. A. (2016). Tensometric method of the analysis of results of observations on geodynamic ground. *Markshejderskij vestnik [Mine surveying Bulletin]*, 5, 22–25 [in Russian].
25. Izyumov, S. F., Kuzmin, Yu. O., & Fattakhov E. A. (2016). Analysis of laser rangefinder observations in the Kopet-Dag region by the methods of tensometry. In *Sbornik materialov III vserossijskogo soveshhanija i II vserossijskoj shkoly po sovremennoj geodinamike: Sovremennaja geodimaniika central'noj Azii I opasnye prirodnye processy: rezul'taty issledovanij na kolichestvennoj osnove [Proceedings of III of the All-Russian Meeting and II All-Russian Schools on the Recent Geodynamics: The Recent Geodynamics of Central Asia and Natural Hazards: Results of Researches on a Quantitative Basis. Materials]* (pp. 102–107). Irkutsk IEC SB RAS [in Russian].

Received 06.09.2017

© Ye. A. Fattakhov, 2017