

УДК 521.1

АНАЛИЗ ШИРОТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

© 2021 г. Р. Р. Мубаракшина¹, В. В. Лапаева¹, Р. А. Кашеев¹, Р. В. Загреддинов¹,
Ю. А. Нефедьев^{1,*}, А. О. Андреев¹

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*E-mail: star1955@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.12.2019 г.

После доработки 30.10.2020 г.

Принята к публикации 30.10.2020 г.

Настоящая работа посвящена анализу данных долговременных широтных наблюдений, а также данных ГНСС измерений. Широтные наблюдения включают периодические и случайные гармоники с малыми амплитудами как составляющие шумов разной природы и продолжительности. Исследование таких гармоник может дать много информации о сейсмологии, геодинамических процессах и строении Земли в окрестности телескопа. Ценность наблюдений, проводимых на территории определенной обсерватории, заключается в их достоверности, однородности, длительности наблюдательных рядов и уникальности. Целью редукции широтных наблюдений является построение графика изменения со временем средней широты пункта наблюдения в течение длительного промежутка времени. В настоящей работе был выполнен анализ кривой неполярных (без компонентов, обусловленных движением полюса) колебаний средней широты. Проведен сравнительный анализ периодических оставляющих вековых изменений средней широты и ГНСС наблюдений. С использованием данных ГНСС наблюдений определены геодинамические параметры динамики земной коры относительно тектонических разломов на территории Республики Татарстан, а на основе анализа аномальных расхождений вариаций астрономической широты от прогнозируемой модели показана корреляционная связь с сейсмическими процессами.

DOI: 10.31857/S0004629921030014

1. ВВЕДЕНИЕ

В Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта (АОЭ) Казанского университета наблюдения за изменчивостью широты продолжаются более века. Наблюдения в 1957–2006 гг. проводились по программе, которая дает не только положение полюса, но и позволяет изучать медленные вариации средних широт и нутационное движение земной оси. Производимые длительное время широтные наблюдения в окрестности одной обсерватории заслуживают пристального внимания, так как они несут в себе сведения об огромном количестве шумов всевозможного происхождения и длительности. Шумы включают в себя значительное количество независимых и часто повторяющихся колебаний с малыми амплитудами. Изучение данных колебаний является актуальным ввиду того, что они:

1) показывают, насколько сейсмичным является регион в окрестности обсерватории;

2) включают данные геофизического характера структуры планеты и геодинамических процессов вблизи пункта наблюдения.

Достоверность, изоморфность и долговременность – это основные характеристики многолетних наблюдений, проводимых на территории обсерватории.

Изучение вариаций средней широты обсерватории за многолетний промежуток времени из наблюдений широты места является одной из основных задач данного исследования. Значения вариаций полюса, необходимых для анализа динамики полюсов Земли, в настоящей работе не рассматриваются. Данное исследование направлено на изучение динамики неполярных вариаций средней широты с исключением довольно хорошо исследованных ее составляющих, относящихся непосредственно к движению полюсов планеты [1]. На основе длительного ряда наблюдений были определены параметры среднеширотных вариаций, включающие компоненты шумов, таких как среднеширотные полярные вариации

ции, среднеширотные полярные вариации с периодами в 0.5 года и 1 год, чандлеровское перемещение полюсов, свободные, практически точные, движения полюсов, вековое перемещение полюсов, а также неполярные вариации средней широты.

Другим интересным приложением исследования широтных наблюдений является нахождение их корреляционных связей с сейсмическими процессами. Данный вопрос является производным от нахождения связи движения полюсов и земной сейсмикой. Дискуссии о связи движения полюсов и неравномерности скорости вращения Земли с сейсмической активностью велись в 1960–1970 гг. [2]. В частности, был изучен вопрос о влиянии на период Чандлера землетрясений [3, 4]. Интерес к подобным исследованиям сохраняется до сих пор. В частности, были проведены исследования Чандлеровского периода и их связи с вращением Земли и сейсмичностью [5–7]. Также обсуждалась корреляция между случаями землетрясений и аномальными отклонениями времени и широты для обсерваторий, расположенных вблизи эпицентра [8–10]. Учеными Института астрономии Российской академии наук и Крымской астрофизической обсерватории из анализа 130 тысяч землетрясений была установлена высокая корреляция между глобальной сейсмической активностью и изменениями угловой скорости вращения Земли [11]. О.В. Пономарева из Дальневосточного научного центра обнаружила, что высокая корреляционная связь между параметрами, которые характеризуют вращение Земли и сейсмическую активность, проявляется на длительных временных интервалах.

2. АНАЛИЗ ШИРОТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ В АОЭ, КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Одним из наиболее надежных методов для выявления периодических гармоник при изучении неполярных изменений при редукции широтных рядов является метод корреляционно-спектрального анализа. Суть его заключается в следующем. Пусть имеется некоторый случайный временной ряд измерений данных $U_i(t)$, $t = 1, 2, 3, \dots, T$. В этом случае автокорреляционная функция, характеризующая общую зависимость значений процесса $U_i(t)$ в целом, для какого-то заданного момента времени t , отличающегося от его значений в другие моменты времени на величину τ , может быть представлена как:

$$R(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \sum_{t=0}^T U_i(t)U_i(t + \tau). \quad (1)$$

В свою очередь спектральная плотность мощности случайного процесса определяется с помощью следующего выражения:

$$S(f) = 4 \sum_{\tau=0}^T R(\tau) \cos 2\pi\tau, \quad (2)$$

где f – частота колебательного процесса, которая обычно задается через равные интервалы времени (в нашем случае – это недели, месяцы, годы). Эта функция описывает частотную структуру заданного процесса. Если проводить анализ только в интервале частот функции $S(f)$, то появляется “белый” спектр, а это говорит о том, что все частоты одинаково участвуют в образовании процесса, и, согласно методу спектрального анализа, в таком процессе отсутствуют периодические гармоник. Когда функция $S(f)$ имеет пик, это говорит о присутствии гармоник с частотой f . При больших значениях τ автокорреляционная функция $R(\tau)$ определяется со значительными погрешностями. Чтобы избежать этого, ограничивают значения $\tau \leq \tau_0$, где τ_0 – произвольно выбранная величина. Перед проведением спектрального анализа обычно производят сглаживание автокорреляционной функции посредством умножения ее на так называемое шаговое или корреляционное окно $r(\tau)$ – это специально подобранная функция, которая равна нулю, когда $\tau > \tau_0$, и монотонно убывает при увеличении τ от 0 до $\tau = T$. Тогда спектральную плотность мощности можно записать в следующем виде

$$S(f) = 4 \sum_{\tau=0}^T R(\tau) \cos 2\pi f \tau. \quad (3)$$

На практике часто используют так называемое окно Tukey [12], которое описывается следующей функцией:

$$r(\tau) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \frac{\pi\tau}{\tau_0} \right] \quad (4)$$

для $\tau \leq \tau_0$, и $r(\tau) = 0$, если $\tau > \tau_0$.

Весьма критичным моментом при использовании метода спектрального анализа является правильный выбор значения τ_0 . Практика показывает, что чем меньше τ_0 , тем более сглаженным получается спектр, и уменьшается разрешение. Поэтому обычно значение τ_0 берется равным T с целью выявления всех гармоник. В случае, когда $\tau_0 = T$, возникает так называемое разрешение.

Если все изложенные выше условия соблюдены, то мы имеем функцию $R(\tau)r(\tau)$ гладкой и затухающей, без резких обрывов. Задавая теперь значения $f = 1, 2, 3, \dots$, находим функцию $S(f)$, и с ее помощью строим график, по оси абсцисс которо-

го отложены частоты f , а по оси ординат – величины $S(f)$.

По полученному таким образом спектру выявляются колебания широты, кроме годичной, полугодовой и чандлеровской волн, а также долгопериодические колебания с продолжительностью периодов изменения от нескольких лет до десятков и сотен лет.

Поскольку значительную часть неполярных изменений широты составляют периодические компоненты, желательнее подробно изучить их структуру: частотный состав, значения амплитуд и начальных фаз, их временные изменения, т.е. стабильность.

Для изучения спектральной структуры неполярных изменений широты использовалась корреляционная схема анализа по способу Tukey [12].

При использовании этого метода прежде всего вычисляются корреляционные функции изучаемых последовательностей и затем разлагают их в спектры мощности. Для несмещенной оценки корреляционной функции конечной последовательности U , содержащей n членов, можно использовать формулу:

$$B_\tau = \frac{1}{n - \tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} U_i U_{i+\tau}, \quad (5)$$

где $0 \leq \tau \leq n$. При $\tau = 0$ получим $B_0 = \sigma^2$ – дисперсию изучаемой последовательности, или ее полную энергию. При вычислении частотных спектров обычно вводится безразмерный параметр частоты K :

$$K = \frac{2T_m}{T_K}, \quad (6)$$

$$w_K = \frac{K}{2T_m}, \quad (7)$$

где T_m – продолжительность данной реализации ряда наблюдений, T_K – период, соответствующий частоте.

Оценка спектральной плотности для частоты K имеет следующий вид:

$$S(K) = \frac{1}{m} \sum_{\tau=0}^{m-1} \delta_\tau B_\tau \left(1 + \cos \frac{\pi}{T_m} \tau \right) \cos \frac{\pi}{T_m} \tau K, \quad (8)$$

где $\delta_\tau = \frac{1}{2}$ для $\tau = 0, m$; $\delta_\tau = 1$ для $\tau = 1, 2, 3, \dots, -1$; m – число ординат корреляционной функции для длины ряда, которая принята при вычислении $S(K)$; B_τ – ординаты корреляционной функции, вычисленные для максимальной продолжительности реализации; T_m – продолжительность данной реализации или ширина спектрального окна метода Tukey; $\left(1 + \cos \frac{\pi}{T_m} \tau \right)$ – множители весовой

функции Tukey; $\left(\cos \frac{\pi}{T_m} \tau K \right)$ – гармоники косинус-преобразования Фурье.

Скрытые периодичности выявляются по всплескам спектральных плотностей на соответствующих частотах. Фундаментальная частота определяется соотношением

$$w_0 = \frac{\pi}{T_m}. \quad (9)$$

Независимыми будут два колебания, частоты которых отличаются на $2w_0$.

Определив по спектру значения периодов предполагаемых гармонических компонентов

$$f_i = A_i \cos \left(\frac{2\pi}{T_i} T + \hat{O}_i \right), \quad (10)$$

методом наименьших квадратов находят их амплитуды и начальные фазы.

Для получения долгопериодических неполярных изменений широты или так называемой “средней широты” использовалось линейное преобразование исходной последовательности широт по формуле вида

$$\varphi_t^m = \sum_i K_i \varphi(t + i), \quad (11)$$

где K_i – некоторые постоянные коэффициенты; t – момент, к которому относится средняя широта.

Для вычисления средней широты мы воспользовались линейным преобразованием, которое называют формулой Орлова–Сахарова [13]:

$$\varphi_{t+9}^m = \frac{1}{40} \sum_{i=1}^{10} (\varphi_t + \varphi_{t+3} + \varphi_{t+6} + \varphi_{t+9}), \quad (12)$$

где φ_t – сглаженные значения широт, взятые через 0.1 года.

В результате было выполнено исследование неполярных вариаций широты, полученных в период 1979–2006 гг. Спектр неполярных вариаций показан на рис. 1, 2. На этих графиках по оси ординат даны значения спектральной плотности в единицах $(10^{-6})^2$, по оси абсцисс верхняя шкала дает значения параметра частоты (\mathbf{K}), нижняя (\mathbf{T}) – величины периодов в годах для предполагаемых периодических гармоник. Графики на рис. 1 и 2 построены следующим образом. Данные спектрального анализа наносились программно сначала в виде точек и затем аппроксимировались кривой. Для этого использовался метод Savitzky-Golay [14], который позволяет сохранить формы пиков. Метод Savitzky-Golay выполняет полиномиальную регрессию к точкам данных в рамках движущегося по этим точкам окна. В нашем случае использовалось полиномиальное разложение до гармоник пятого порядка.

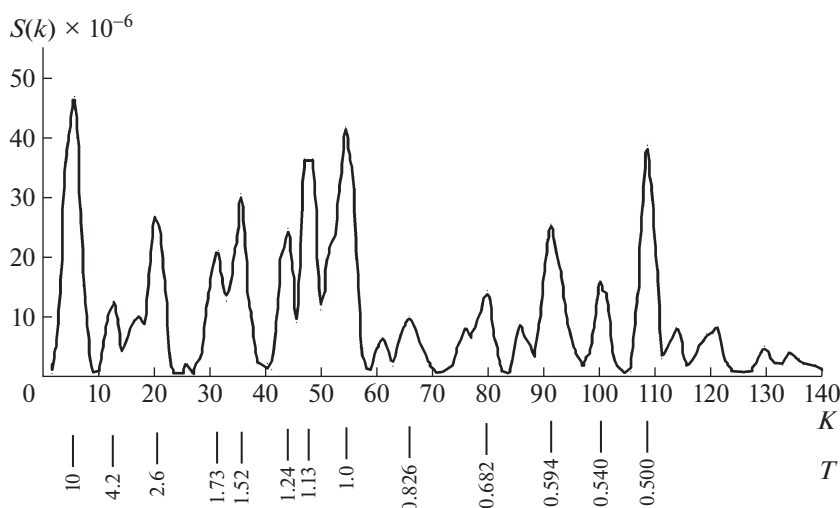


Рис. 1. Разложение неполярных широтных колебаний 1979–2006 гг.

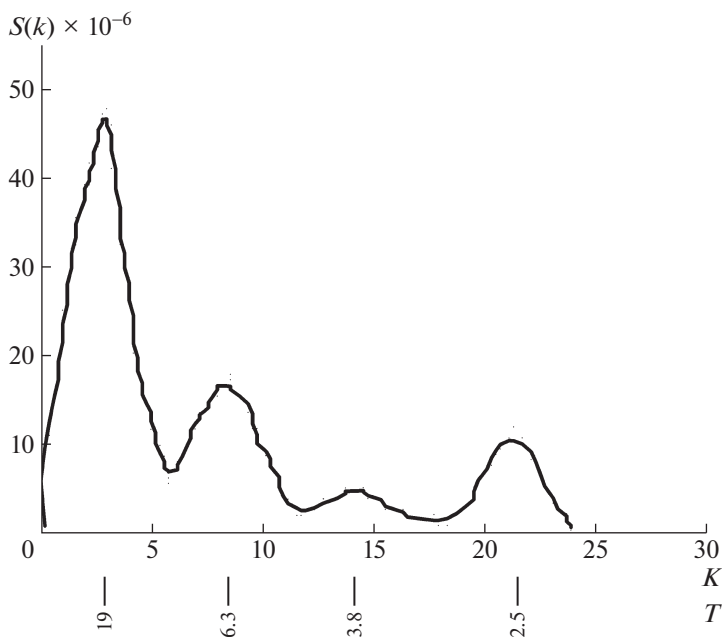


Рис. 2. Разложение долгопериодических неполярных флуктуаций широты 1979–2006 гг.

Анализ построенных на рис. 1, 2 графиков позволяет сделать вывод о том, что разложение неполярных широтных вариаций обладает сложной структурой и включает в себя около двух десятков пиков и расхождений плотности разложения. Рассматриваемая временная зависимость состоит не только из гармонических элементов, присутствуют также вариации для амплитуд, периодов, начальной фазы. Следствием всего вышперечисленного являются затруднения при описании разложений изучаемых широтных наблюдений во

временные ряды. Периоды самых существенных прогнозируемых периодических элементов на рис. 1, 2 в неполярных широтных колебаниях соответствуют значениям 10; 2.6; 1.52; 1.24; 1.13; 1.0; 0.594 и 0.5 года. С периодами 19; 6.3; 3.8 и 2.5 года связаны пики в разложении долгопериодических широтных измерений с 1979 по 2006 г. Для надежного определения компонентов с более значительными периодами предполагается исследование наблюдений, выполненных на более длительных временных интервалах.

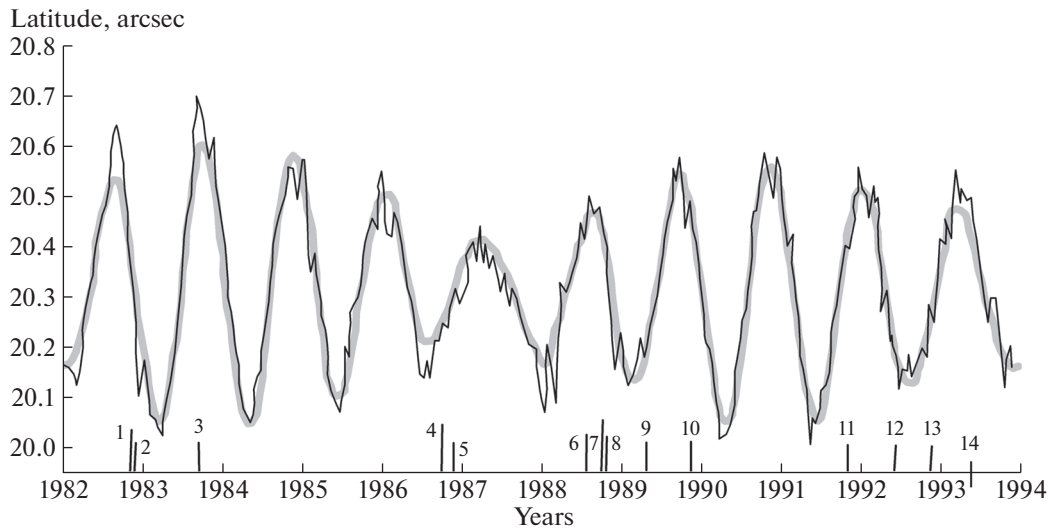


Рис. 3. Короткопериодические вариации средней широты 1982–1994 гг. На графике приведены полученные из наблюдений значения вариации широты (сплошная линия) и прогнозируемая модель колебаний широты, созданная по данным изменения координат полюса (сплошная серая линия).

3. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ ВАРИАЦИЙ ШИРОТЫ С СЕЙСМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Небесно-механическим характером обладают как лунные, так и земные сейсмические процессы. Постоянные сжатия и флуктуации нашей планеты и околопланетной зоны приводят к постоянно колеблющимся и варьирующимся координатным изменениям в пространстве, о чем свидетельствуют астрономические и геодезические работы [15]. Большинство сейсмических толчков, сила которых больше шести баллов, соответствуют аномальным отклонениям широтных измерений от нормального распределения [13, 16]. Следует отметить, что главные перемещения литосферы в геофизике определяются лишь условным образом, точную численную оценку позволяют выполнять только астрометрические наблюдения.

На рис. 3 представлены короткопериодические вариации средней широты, полученные в наблюдениях 1982–1994 гг. Всего было получено около 3 тысяч отдельных значений. Для исключения случайных ошибок наблюдений все 3 тысячи отдельных значений широты были сгруппированы в нормальные точки. Осреднение выполнялось на интервалах 5–20 сут в зависимости от плотности наблюдений. Среднее значение интервала осреднения составляет 14.7 сут или 0.04 года. Каждая нормальная точка содержит от 7 до 22 отдельных значений широт. Зная точность одного наблюдения и учитывая веса исходных

точек, можно получить меру точности μ по формуле:

$$\mu = \frac{\sigma^2}{2n}, \tag{13}$$

где n – среднее число наблюдений на интервале осреднения, σ^2 – дисперсия одного наблюдения:

$$\sigma^2 = \frac{D}{S} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \frac{1}{n_i}. \tag{14}$$

Здесь S – число нормальных точек, n_i – число широт в i -й нормальной точке, D – дисперсия исходных нормальных точек. В итоге, если принять среднее значение $\sigma^2 = 0.007854$, которое получается из анализа широтных рядов, можно записать для меры точности, что данный параметр находится в диапазоне от 0.000561 до 0.000178.

Все полученные усредненные точки были нанесены на график (см. рис. 3), и затем была проведена их аппроксимация по методу Savitzky-Golay с полиномиальным разложением до гармоник пятого порядка. На рисунке результат показан черной сплошной ломаной линией. По горизонтальной оси отложены годы, а по оси ординат – значения широты, полученной из наблюдений. На этом же рисунке показана кривая изменения широты, вычисленная по данным координат полюса (гладкая серая кривая).

При построении этого рисунка значение средней широты Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта (АОЭ) было принято равным $20.318''$, так как по данным координат полюса

Таблица 1. Параметры сейсмических толчков, произошедших на Ромашкинском месторождении

№	Дата	MS
1	1982.8246	3.3
2	1982.8904	3.2
3	1983.8630	3.2
4	1986.7288	3.8
5	1986.7315	3.9
6	1988.5382	3.3
7	1988.7186	3.1
8	1988.7951	3.1
9	1989.2932	3.2
10	1989.8630	3.2
11	1991.8246	3.6
12	1992.4126	3.2
13	1992.8640	3.2
14	1993.5945	3.2

са вычисляются только вариации широты. Данные координат полюса (X и Y) были взяты из ежемесячных бюллетеней Международной службы вращения Земли и Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли Российской Федерации.

Согласно рис. 3, в 1984–1985 гг. значительных изменений в широте не было, поэтому наблюдаемая и вычисленная широты на этом временном интервале достаточно хорошо совпадают. Два заметных расхождения в 1985 г. содержат только по одной нормальной точке, так что их можно отнести к категории случайных явлений. Заметные аномальные отклонения наблюдаемой широты от вычисленной по координатам полюса стали проявляться лишь после 1986 г. При этом величина отклонения составляет в среднем $0.10''$ и меняется в интервале от $0.05''$ до $0.13''$.

Перпендикулярными оси абсцисс черточками на рис. 3 обозначены моменты произошедших сейсмических толчков в Республике Татарстан на Ромашкинском месторождении, имеющие более $3 M_s$ (Surface Wave Magnitude). Данные сейсмических толчков приведены в табл. 1. Наиболее значимыми можно считать землетрясения 24.09.87, 19.09.88, 17.04.89, 11.11.89 и 28.10.91, на рис. 3 им соответствуют номера 4, 7, 9, 10, 11.

Согласно данным сейсмических толчков, произошедших в 1982, 1983, 1986, 1988 г., наблюдались определенные расхождения прогнозируемых модельных расчетов от наблюдательных данных, но после 1988 г. расхождения стали менее явными. Аномальные расхождения вариаций широты составляют около $0.1''$ и не зависят от силы сейсми-

ческого толчка, но при этом наблюдается наличие связи с аномальными вариациями широты.

На рис. 4 представлен усредненный график вариаций широты за период с 1987 по 1990 г., построенный согласно наблюдаемым значениям (сплошная линия), и прогнозируемая модель колебаний широты, созданная по данным изменений координат полюса (штриховая линия). Как и в случае рис. 1, 2, вначале наносились точки, соответствующие значениям широты, а затем проводилась аппроксимационная линия по методу Savitzky-Golay с полиномиальным разложением до гармоник пятого порядка. Из сравнения полученных кривых друг с другом с уверенностью выявляются минимум 14 аномальных отклонений, из которых 4 оказываются весьма значительными. Они по величине расхождения заметно превосходят 10 оставшихся других расхождений. Эти четыре отклонения коррелируют с четырьмя землетрясениями, произошедшими в г. Набережные Челны в 1988–1989 гг.: 10 июня 1988 ($2.5 M_s$), 16 июля 1988 ($2.7 M_s$), 17 апреля 1989 ($3.3 M_s$), 11 ноября 1989 ($2.7 M_s$). Причем перед сейсмическими толчками, обозначенными на рис. 4, примерно за 4–5 мес можно наблюдать аномальные расхождения наблюдаемых широт от прогнозируемой модели. Каждая точка на кривой является усредненным значением двух десятков отдельных измерений, что не позволяет считать такого рода события случайными.

Рассмотрим 10 оставшихся отклонений. 10 расхождений значений аномальных отклонений невелики и не выходят за пределы интервала от 0.02 до 0.10 . Это позволяет сделать два следующих вывода. Во-первых, такие небольшие по своим значениям аномальные отклонения в целом еще не свидетельствуют об обязательном наступлении землетрясения, так как у нас отсутствуют какие-либо достоверные сведения об этих событиях, которые могли бы иметь место на востоке республики. Во-вторых, их наличие свидетельствует о том, что в поверхностных слоях непрерывно происходят кратковременные или даже эпизодические подвижки в земной коре, изменяющие наклон поверхности Земли по отношению к некоторому среднему его положению, что и вызывает изменение широты местоположения АОЭ, определяемого по астрономическим данным измерений.

4. АНАЛИЗ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ НЕПОЛЯРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕЙ ШИРОТЫ 1978–1994 ГГ. НА АОЭ

На рис. 5 в секундах дуги представлен график долгопериодических вариаций (нерегулярная кривая) неполярных изменений средней широты на АОЭ, полученная из наблюдений 1978–1994 гг.

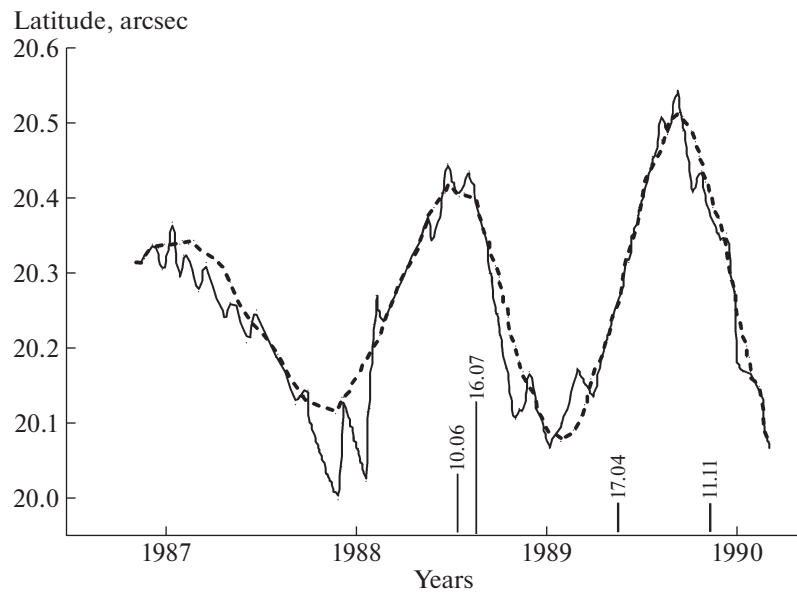


Рис. 4. Аномальные расхождения вариаций широты от прогнозируемой модели и связь с сейсмическими процессами. На графике приведены полученные из наблюдений значения вариации широты (сплошная линия) и прогнозируемая модель колебаний широты, созданная по данным изменения координат полюса (штриховая линия).

путем исключения колебаний всех периодических составляющих, как полярных, так и неполярных. На рисунке по горизонтальной оси отложено время в годах, а по вертикальной — изменение средней широты. Отклонения от этого значения в $0.02\text{--}0.03''$ представляют собой, по астрономическим меркам, значительные величины и не могут быть объяснены инструментальными ошибками. График показывает, что до 1980 г. не наблюдалось значительных изменений средней широты. В середине 1980 г. средняя широта начала увеличиваться и достигла максимального значения в 1981 г. Следующая флуктуация средней широты имела место в 1984 г. Самые же значительные изменения средней широты имели место в 1987–1988 гг. В целом изменения средней широты носят неправильный, волнообразный характер. Но на некоторых интервалах времени заметен ощутимый линейный тренд. Так, на интервале 1980–1984 гг. в течение четырех лет средняя широта увеличивалась со скоростью $+0.0052''/\text{год}$, а в интервале 1984–1988 гг. средняя широта уменьшалась со скоростью $-0.0095''/\text{год}$. В линейной мере указанные изменения составляют 0.16 и 0.29 м соответственно. С такой скоростью происходили смещения (деформации) земной коры, на которой находится АОЭ. Эти величины могут показаться большими. Но нужно иметь в виду, что классические астрономические инструменты измеряют абсолютное смещение земной коры относительно звезд, тогда как смещения, измеряемые в геодезии, являются относительными.

5. АНАЛИЗ ИЗМЕНЯЕМОСТИ ДИНАМИКИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ

Необходимо отметить, что спутниковые методы позиционирования уже более десяти лет активно используются на территории Республики Татарстан (РТ) для координатного обеспечения геодезических, геологоразведочных, изыскательских и маркшейдерских работ, а также решения задач земельного кадастра. Хорошо известно, что к числу важнейших достоинств спутниковых методов позиционирования относятся их высокая точность и оперативность, открывающие широкие возможности изучения динамики регионов, характеризуемых повышенной активностью тектонических процессов.

Интерес к исследованиям геодинамических явлений обусловлен тем, что безопасное ведение человеком хозяйственно-экономической деятельности возможно только при получении целостной картины о процессах, происходящих в недрах Земли и на ее поверхности. Изучение современных движений и деформаций земной коры требует проведения в мониторинговом режиме высокоточных измерений смещений геодезических пунктов. Жесткие требования к проведению подобного рода геодезических работ — обширные территории, охватываемые измерениями, высокий уровень точности определения величин движений и деформаций, короткие периоды между сериями инструментальных измерений — предопреде-

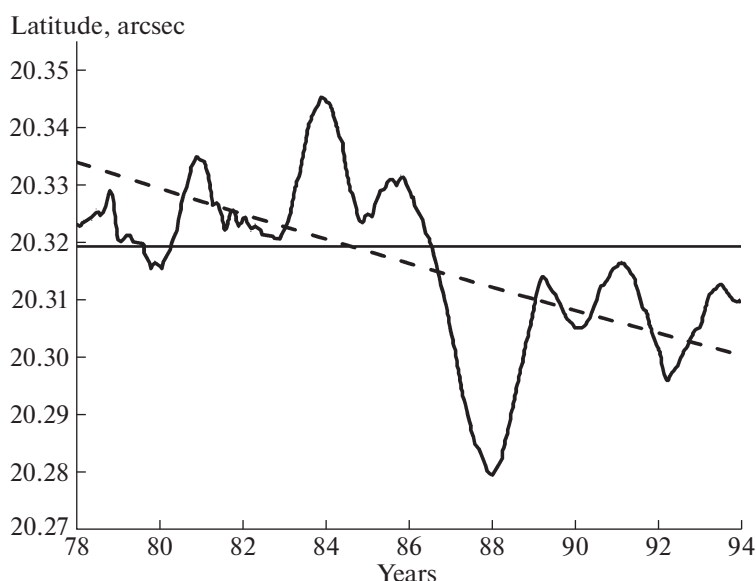


Рис. 5. Неполярные флуктуации средней широты АОЭ 1978–1994 гг.

ляют необходимость использования при проведении исследований современного высокоточного и производительного геодезического оборудования.

Республика Татарстан находится в одной из зон повышенной активности Русской платформы, вследствие чего изучение сейсмичности региона представляется необходимым и актуальным. Начиная с 1985 г. на территории Татарстана было зафиксировано около 100 землетрясений, силой 4–5 и даже 6 баллов. Большинство эпицентров сгруппировано вдоль Алтунино-Шунакской разломной зоны и вдоль Прикамской системы разломов. Кроме того, сейсмическая активность проявляется и по другим разломам фундаментов Южно-Татарского свода, приуроченным к Ромашкинскому и Ново-Елховскому месторождениям. По этой причине исследование сейсмической активности данного региона различными, в том числе и астрономо-геодезическими, методами представляется важным для прогноза сейсмической активности вблизи нефтеперспективных месторождений и обеспечения геодинамической безопасности территории. Учитывая сказанное, мониторинг положений пунктов опорной спутниковой сети Республики Татарстан оказывается необходимым условием обеспечения безопасности эксплуатации размещенных на ее территории объектов и инженерно-технических сооружений, предотвращения чрезвычайных ситуаций и экологических катастроф различной природы.

В 2006–2015 гг. на существующих базовых станциях РТ был накоплен значительный объем измерительных данных, анализ которых позволяет впервые исследовать геодинамику региона и в плановых координатах, и по высоте. Использование при об-

работке ГНСС измерений специализированного программного обеспечения GAMIT/GLOBK дает возможность получить координаты пунктов в международной системе отсчета ITRF с высокой точностью, открывающей перспективы изучения геодинамических явлений, как в глобальном, так и региональном масштабах. Надежность, точность и чувствительность ГНСС наблюдений подтверждаются их реакцией на катастрофическое землетрясение, произошедшее 11 марта 2011 г. в области Тохоку (Япония) [17].

Станция KAZN, функционирующая с 2008 г., расположена в Городской Астрономической обсерватории Казанского федерального университета, что позволяет сопоставлять выполненные на ней ГНСС измерения с измерениями широты, которые получены на телескопе ЗТЛ-180 АОЭ в 1957–2006 гг. На рис. 6 представлены направления и величины векторов векового смещения геодезических пунктов на территории РТ, на которых выполнялись рассматриваемые ниже наблюдения: KAZN (КФУ, г. Казань), AZNK (г. Азнакаево), ELAB (г. Елабуга), МАКТ (г. Альметьевск), SAMR (г. Самара), КСНР (г. Кирово-Чепецк). Каждому пункту соотнесены векторы планового смещения, основной составляющей которых являются вековые сдвиги базовых станций в направлении на северо-восток со скоростью от 20.90 мм/год (ELAB) до 26.34 мм/год (AZNK) и в направлении на север со скоростью от 6.54 мм/год (ELAB) до 9.50 мм/год (KAZN). Для процедуры оценки качества наблюдательных данных наилучшим образом подходит свободно распространяемая и доступная на сайте производителя программа TEQC (Translating, Editing, Quality Checking). Эта

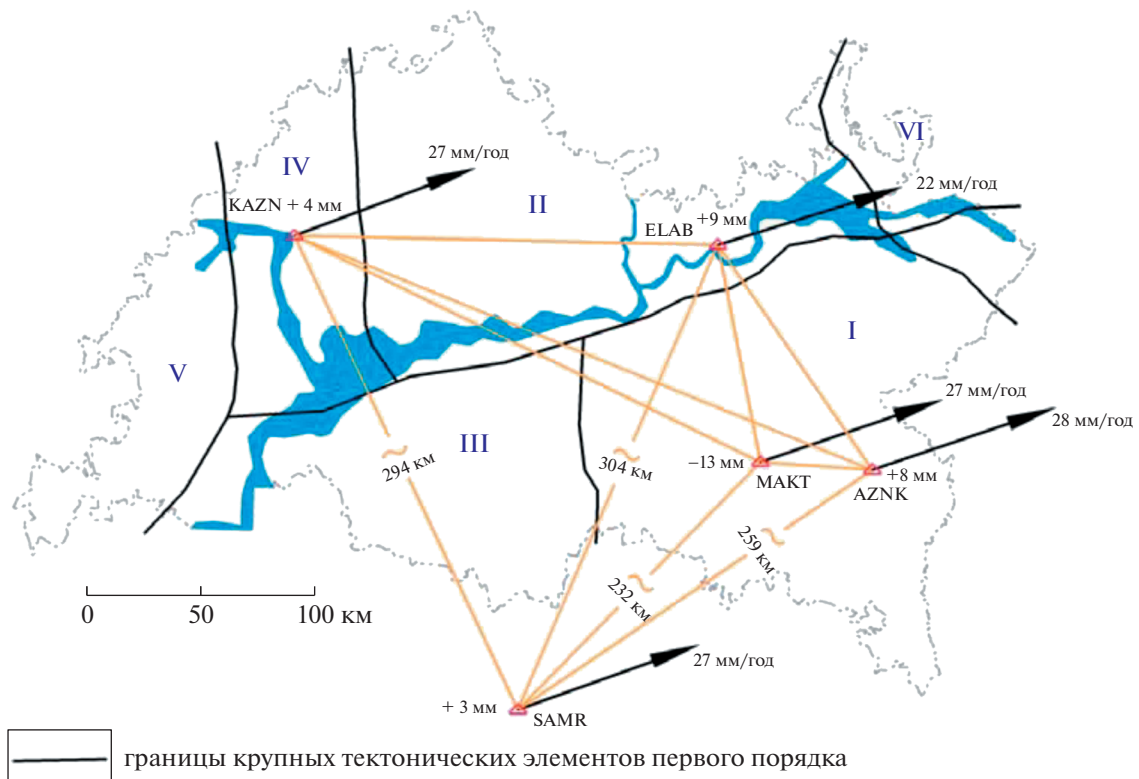


Рис. 6. Схема современной динамики земной коры относительно тектонических разломов: Южно-Татарский свод (I), Северо-Татарский свод (II), Мелекесская впадина (III), Казанско-Кировский прогиб (IV), Токмовский свод (V) и Камско-Бельский авлакоген (VI).

утилита предназначена для конвертирования исходных бинарных файлов различных форматов, зависящих от типа ГНСС приемника, в универсальный текстовый формат (RINEX – Receiver Independent Exchange Format), понятный большинству программ обработки спутниковых измерений, а также для редактирования файлов ГНСС измерений и оценки качества. В режиме оценки качества измерений программа TEQC на основе RINEX файлов формирует файлы отчета, где содержится вся необходимая для оценки качества информация, а также файлы графиков в формате UNAVCO COMPACT.

В результате были получены данные, приведенные на рис. 6. Анализ рис. 6 показывает, что скорость движения тектонической плиты в районе АОЭ (пункт KAZN) равна 25.34 ± 0.10 мм/год в направлении на восток и 9.5 ± 0.11 мм/год в направлении северного полюса, что в итоге дает величину скорости изменения вектора движения пункта 27 мм/год. Этому смещению соответствует вековое изменение положения АОЭ примерно на $0.0002''$ /год и хорошо согласуется с величиной и направлением векового перемещения Евразийской литосферной плиты. При этом смещение по вертикали составляет 4.30 ± 0.36 мм/год.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы из полученных результатов следующие. Темпоральные (временные) изменения астрономической широты, определяемые традиционными астрометрическими методами, равно как и изменения со временем геодезических координат, устанавливаемые путем ГНСС позиционирования, имеют сложную и противоречивую геофизическую природу. При этом важно подчеркнуть принципиальное различие астрометрических и спутниковых методов определения координат, заключающееся в том, что процедура ГНСС позиционирования точек физической (гипсометрической) поверхности Земли не зависит от воздействия локального поля силы тяжести в окрестности станции, т.е. не связана с положением локального геоида. Напротив, в рамках классической астрометрии основным определяемым направлением является направление отвесной линии, устремленной по нормали к поверхности геоида, вследствие чего вариации астрономической широты оказываются обусловленными как смещениями физической поверхности, так и изменениями наклонов локального геоида.

По этой причине отсутствие прямой релевантности (не перекрывающихся по времени) веко-

вой составляющей темпоральных изменений астрономической широты и геодезических координат в очередной раз свидетельствует как о сложности происходящих геофизических процессов, так и о необходимости повышения точности их регистрации. Уместно заметить в этой связи, что авторы настоящей статьи связывают прогресс в этом направлении с дальнейшим развитием методов ГНСС нивелирования, позволяющих осуществлять мониторинг изменений со временем аномалий высоты и уклонений отвесной линии на выбранных территориях. С 2014 г. на территории АОЭ двухсистемным (ГЛОНАСС/GPS) трехчастотным (L1/L2/L5) ГНСС приемником TRIMBLE NetR9 выполняются ГНСС измерения, данные которых накапливаются в виде RINEX-файлов с интервалом 30 с, что дает основания рассчитывать на успешное продолжение геодинамических исследований в этом регионе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Настоящая работа частично поддержана Российским научным фондом, гранты 20-12-00105 (согласно гранту разработан метод анализа данных). Работа выполнена в соответствии с Программой Правительства Российской Федерации по конкурентному росту Казанского федерального университета. Работа частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 19-32-90024 “Аспиранты” и Фондом развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *V. Lapaeva, V. Meregina, and Y. Nefedjev*, Geophys. Res. Lett. **32**, (2005).
2. *Y. Barkin and J. Ferrandiz*, Trans. Sternberg State Astron. Inst. **78**, 7 (2005).
3. *Y.-B. Han, J. Tian, and H.-R. Du*, Astrophys. Space Sci. **177**, 383 (1991).
4. *H. Hu, Y. Li, and R. Wang*, Acta Geophys. Sin. **31**, 483 (1988).
5. *М. М. Машимов*, Планетарные теории геодезии (М.: Недра, 1982).
6. *M. Meinig*, Wissenschaftliche Zeitschrift der Tech. Universitat Dresden **38**, 8 (1989).
7. *Г. Мориц and А. Мюллер*, Вращение Земли: теория и наблюдения (Киев: Наукова думка, 1992).
8. *J. Vondrak*, Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia **37**, 324 (1986).
9. *Y. Han, Z. Li, and G. Zhang*, Wissenschaftliche Zeitschrift der Tech. Universitat Dresden **38**, 43 (1989).
10. *K. Yokoyama, K. Tanikawa, and S. Manabe*, in *Earth Rotation and the Terrestrial Reference Frame*, p. 15 (1985).
11. *О. В. Пономарева*, в *Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV международная конференция*, с. Паратунка Камчатской обл., 14–17 августа 2007 г., с. 41 (2007).
12. *J. W. Tukey*, *Exploratory data analysis* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1977).
13. *В. И. Сахаров*, Тр. ГАО АН СССР, с. 2 (1972).
14. *E. J. Karjalainen and U. P. Karjalainen*, *Data analysis for hyphenated techniques* (Elsevier Science, 1996).
15. *Ю. А. Нефедьев, В. В. Лапаева, А. И. Нефедьева, Ш. С. Каратай, В. П. Мережин*, Научный Татарстан, № 3, 68 (2004).
16. *Я. С. Яцкив, Н. Т. Миронов, А. А. Корсунь, В. К. Тарадий*, Итоги науки и техники. Часть I, № 12, 5 (1976).
17. *Р. Р. Мубаракшина, Ю. А. Нефедьев, В. В. Лапаева, Р. А. Кащеев, Р. В. Загретдинов, А. О. Андреев*, Изв. ГАО в Пулкове № 225, 85 (2018).