

Автоматическое исправление искажённых дрейфом изображений зондового микроскопа методами встречного сканирования и распознавания топографических особенностей поверхности

Р. В. Лапшин

НИИ Физических проблем, Лаборатория твердотельной нанотехнологии, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация

Эл. почта: rlapshin@yahoo.com

Предложен подтверждённый экспериментально способ автоматической коррекции искажённого дрейфом рельефа поверхности, полученного на сканирующем зондовом микроскопе. Вызываемые дрейфом искажения описываются линейными преобразованиями, которые справедливы в случае, когда скорость дрейфа микроскопа изменяется достаточно медленно. В качестве исходных данных используется одна или две пары встречно-сканированных изображений (ВСИ) рельефа поверхности. Для исправления искажений необходимо в каждом ВСИ распознать одну и ту же особенность поверхности и определить её латеральные координаты. Решая систему линейных уравнений, находят коэффициенты линейных преобразований, с помощью которых производится коррекция ВСИ в латеральной и вертикальной плоскостях. Совместив затем исправленные ВСИ, выполняется усреднение рельефа в области их перекрытия. Даны рекомендации, позволяющие не только оценивать погрешность исправления дрейфа, но и получать исправленные изображения, погрешность в которых не превышает некоторого заранее заданного значения. На базе линейного способа коррекции предложено два нелинейных способа, обеспечивающих большую точность исправления дрейфа. В зависимости от масштаба и условий измерений, а также применяемого способа коррекции максимальная погрешность может быть уменьшена с 8-25% до 0.6-3%, характерная средняя погрешность по полю исправленного изображения составляет порядка 0.07-1.5%. Разработанный метод позволяет корректировать искажённые дрейфом сегменты/апертуры рельефа, получаемые при использовании особенность-ориентированного способа сканирования. Предложенный метод можно применять на любом приборе семейства сканирующих зондовых микроскопов.

1. Введение

Точность измерения рельефа поверхности, физические размеры элементов которого лежат в диапазоне от нескольких ангстрем до нескольких десятков нанометров, во многом определяется величиной дрейфа сканирующего зондового микроскопа (СЗМ). Как правило, дрейф прибора включает в себя две основные компоненты: одна из них вызвана тепловой деформацией механических узлов прибора, другая – ползучестью используемых пьезоманипуляторов [1]. Для борьбы с дрейфом можно использовать активную компенсацию [2] в процессе измерения и/или исправление [3, 4] результатов сканирования после измерения.

Привлекательность способов, исправляющих сосканированное изображение, к которым относится и способ [5], предлагаемый в данной работе, в сравнении с компенсирующими состоит в том, что искажения можно скорректировать, не модернизируя сам микроскоп. Кроме того, в отличие от пассивных способов, активная компенсация дрейфа вносит дополнительные шумы, что не позволяет использовать её для измерений на пределе разрешения микроскопа.

В основе разработанного метода коррекции дрейфа лежит простая линейная система уравнений, составленная для топографических особенностей, обнаруженных на каждом из встречно-сканированных изображений пары. Более сложная разновидность метода, при которой линейная коррекция дрейфа производится по двум полученным одновременно парам встречно-

сканированных изображений, позволяет достичь заметно лучших результатов. Наконец, переход к нелинейным методам, которые строятся на базе найденных линейных решений, обеспечивает наибольшую точность коррекции дрейфа. Применение нелинейных методов особенно эффективно в случае сильной нелинейной составляющей искажения, вызванной ползучестью пьезоманипуляторов микроскопа.

Особое внимание в работе уделено использованию предложенных методов в особенности-ориентированном сканировании (ООС) [6], а именно, для исправления дрейфа в сегментах и апертурах. ООС – это метод прецизионного измерения топографии поверхности, в котором особенности поверхности используются в качестве точек привязки зонда микроскопа. Метод ООС заключается в том, что в ходе последовательных переходов от одной особенности поверхности к расположенной по соседству другой особенности, производится измерение относительного расстояния между ними, а также измерение топографии окрестностей этих особенностей – сегментов (апертур), что позволяет просканировать заданную область на поверхности по частям, после чего восстановить целое изображение из полученных фрагментов.

Тестирование предложенных методов коррекции дрейфа строится таким образом, чтобы проверить работу этих методов на разных типах зондовых инструментов, на различных типах поверхностей, в разных масштабах, при различных скоростях дрейфа и при разных соотношениях компонент дрейфа (тепловой и ползучести). Сравнение полученных результатов с ранее достигнутыми [3] показывает, что теперь расстояние между соседними атомами углерода на поверхности графита можно измерить с погрешностью не 5%, а с погрешностью в интервале 0.01-0.33%. Повышение точности коррекции дрейфа достигается за счёт использования аналитических выражений, учитывающих все составляющие линейного искажения в растре, перехода к двум парам встречно-сканированных изображений, применения нелинейных методов коррекции, а также методов автоматического распознавания топографических особенностей.

2. Описание способа

2.1. Линейный метод исправления дрейфа по одной паре встречно-сканированных изображений

2.1.1. Построение системы уравнений

Анализ искажений, вызываемых дрейфом зонда микроскопа относительно поверхности образца, показывает, что в латеральной плоскости дрейф приводит к растяжению/сжатию изображения вдоль осей x и y растра, а также к перекосу картинки вследствие сдвига строк/столбцов изображения относительно друг друга. То же самое, но в отношении высоты рельефа, происходит в вертикальной плоскости. Здесь неверно изображаются перепады высот, и появляется добавочный несуществующий наклон поверхности.

Полагая, что скорость дрейфа за время сканирования изображений небольшого размера изменяется медленно [5, 6], описанные искажения можно представить в виде следующих линейных преобразований

$$\begin{aligned} \bar{x}(x, y) &= x + (K_x - 1)\{x + [(k + 1)m_x + 1]y\}, \\ \bar{y}(x, y) &= y + (K_y - 1)\{x + [(k + 1)m_x + 1]y\}, \\ \bar{z}(x, y) &= z(x, y) - (K_z - 1)\{x + [(k + 1)m_x + 1]y\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} – координаты точек исправленного изображения; x , y , z – координаты точек искажённого дрейфом изображения; K_x , K_y , K_z – коэффициенты линейных преобразований (КЛП); k – отношение скорости v_x перемещения зонда в строке при прямом ходе к скорости перемещения при обратном ходе; m_x – число точек (без единицы) в строке искажённого изображения, которое определяет диапазон изменения переменной $x=0\dots m_x$.

Помимо условия постоянства скорости дрейфа уравнения (1) записаны в предположении, что в латеральной плоскости одиночные шаги микроскопа равны между собой $\Delta_x=\Delta_y$, а скорости перемещения одинаковы $v_x=v_y$. Множители K_x-1 , K_y-1 , K_z-1 преобразований (1) описывают вызванное дрейфом смещение по x , y , z , соответственно, при передвижении зонда на один шаг по x или по y . Параметр k необходим для того, чтобы учесть смещение зонда по x , y или z , накопленное за время выполнения обратного хода.

Таким образом, члены $(K_x-1)x$, $(K_y-1)x$, $(K_z-1)x$ учитывают вызываемое дрейфом смещение зонда по x , y , z , соответственно, возникающее во время перемещения зонда по текущей строке. Члены $(K_x-1)(k+1)m_x y$, $(K_y-1)(k+1)m_x y$, $(K_z-1)(k+1)m_x y$ выражают смещение зонда по x , y , z , соответственно, произошедшее за время перемещения зонда по предыдущим строкам. Члены $(K_x-1)y$,

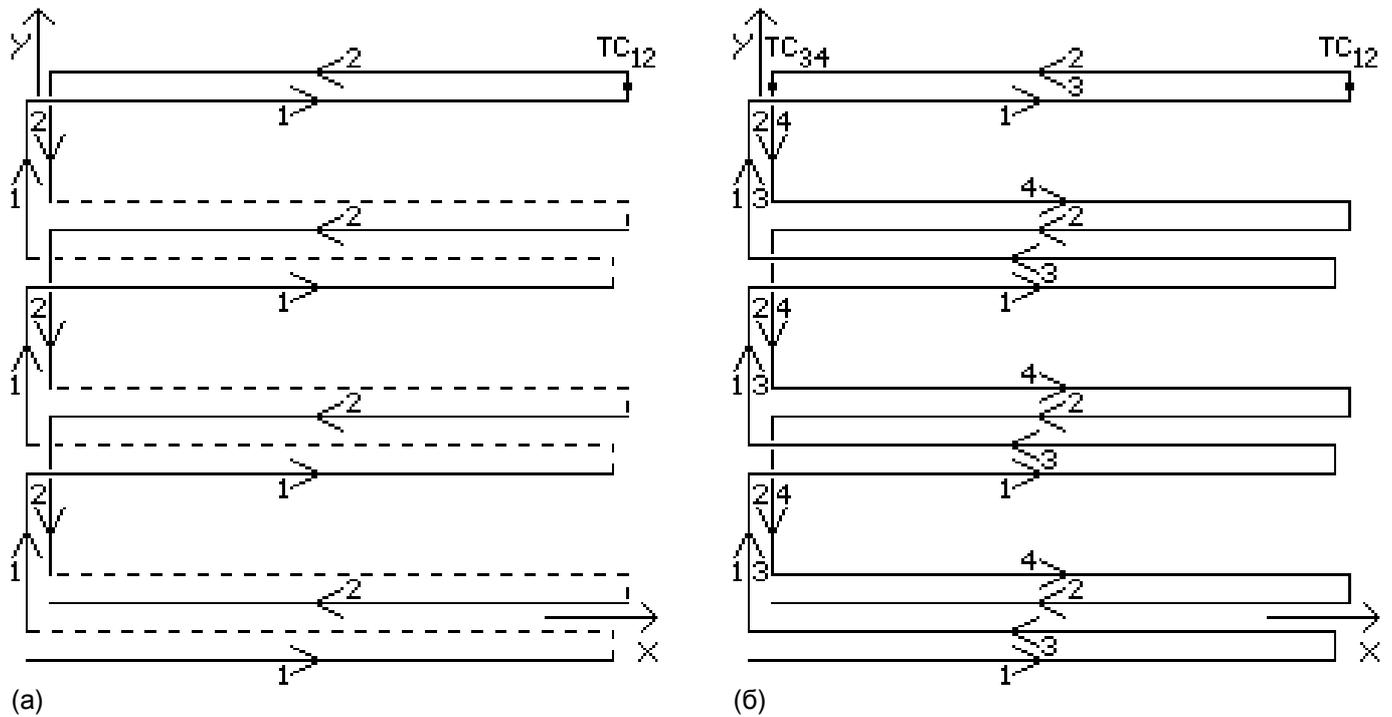


Рис. 1. Схематическое представление траектории движения зонда в процессе встречного сканирования. Четыре строки в растре сканируются встречно, перемещения от строки к строке в паре изображений также осуществляются навстречу друг другу. (а) Встречное сканирование с холостым обратным ходом (показан пунктирной линией). (б) Встречное сканирование без холостого обратного хода. Обе развертки обеспечивают возможность исправления результатов действия x, y и z-составляющих дрейфа. Цифрами 1...4 обозначены номера получаемых изображений. ТС – точка совмещения пары встречно-сканированных изображений. Развертка (б) позволяет добиться дополнительного уменьшения уровня шума в исправленном изображении, однако требует вдвое большего объема памяти и времени вычислений.

$(K_y - 1)y$, $(K_z - 1)z$ принимают во внимание смещение зонда по x, y, z, соответственно, возникшее за время перемещения зонда между строк раstra.

С целью отыскания неизвестных КЛП K_x , K_y , K_z выполним сканирование поверхности по траектории, схематично показанной на Рис. 1а. В результате получим пару изображений (см. Рис. 2а, поз. 1), строки которых прочерчиваются в противоположных направлениях, и перемещения от строки к строке в одном изображении производятся в направлении противоположном направлению перемещения в другом. Скорости сканирования изображений задаются одинаковыми. Подобные изображения будем называть встречно-сканированными изображениями (ВСИ).

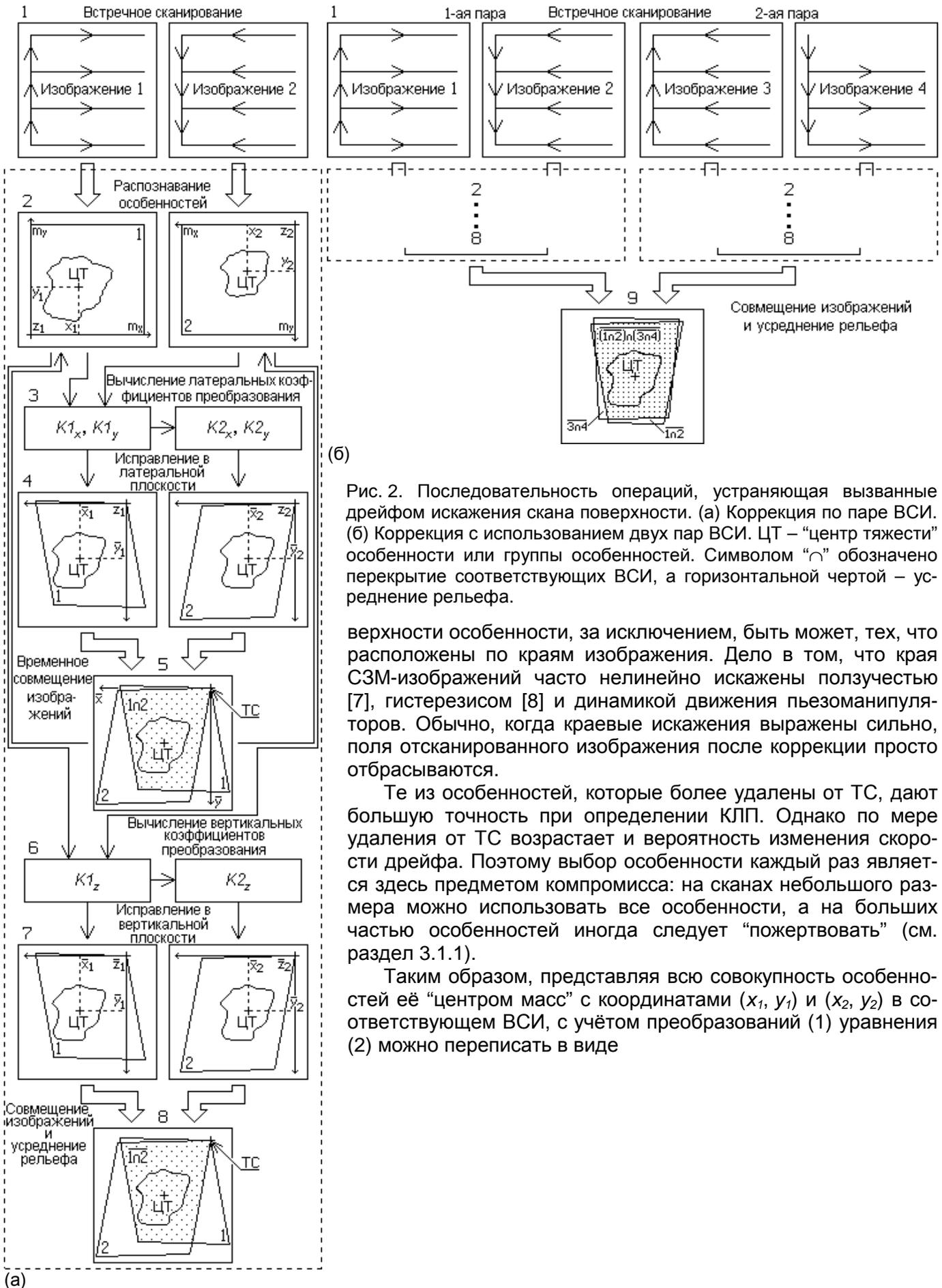
Для ВСИ характерно наличие точки общей для обоих изображений (см. Рис. 1), данную точку будем называть точкой совмещения (ТС). В точке совмещения траектория развертки первого прямого изображения заканчивается, а траектория развертки второго встречного ему изображения начинается. По мере удаления от ТС изображения вследствие действия дрейфа всё сильнее отличаются друг от друга: увеличиваются различия в координатах положения одних и тех же особенностей, а сами особенности претерпевают взаимно-противоположные трансформации (растяжения/сжатия и перекосы).

Если на каждом изображении полученной пары имеется одна и та же особенность поверхности (см. Рис. 2а, поз. 2), то, определив её латеральные координаты (x_1, y_1) и (x_2, y_2) , можно записать следующую систему уравнений

$$\begin{aligned} \bar{x}_1(m_x - x_1, m_y - y_1) &= \bar{x}_2(x_2, y_2), \\ \bar{y}_1(m_x - x_1, m_y - y_1) &= \bar{y}_2(x_2, y_2). \end{aligned} \quad (2)$$

где цифры 1, 2 в обозначениях указывают на принадлежность величины к первому (прямому) или второму (встречному) изображению, соответственно; m_y – число точек (без единицы) в столбце искажённого изображения, которое определяет диапазон изменения переменной $y=0\dots m_y$. Слагаемые m_x и m_y в уравнениях (2) обеспечивают преобразование системы координат 1-го изображения к системе координат 2-го (начало системы координат 2-го изображения находится в ТС).

В целом, для исправления вызываемых дрейфом искажений достаточно выявить на ВСИ только одну особенность и определить её латеральные координаты. Поскольку реальные СЗМ-изображения имеют конечное разрешение, зашумлены и содержат сбойные участки, то для более точного определения параметров коррекции желательно использовать все имеющиеся на по-



(б)

Рис. 2. Последовательность операций, устраняющая вызванные дрейфом искажения скана поверхности. (а) Коррекция по паре ВСИ. (б) Коррекция с использованием двух пар ВСИ. ЦТ – “центр тяжести” особенности или группы особенностей. Символом “∩” обозначено перекрытие соответствующих ВСИ, а горизонтальной чертой – усреднение рельефа.

верхности особенности, за исключением, быть может, тех, что расположены по краям изображения. Дело в том, что края СЗМ-изображений часто нелинейно искажены ползучестью [7], гистерезисом [8] и динамикой движения пьезоманипуляторов. Обычно, когда краевые искажения выражены сильно, поля отсканированного изображения после коррекции просто отбрасываются.

Те из особенностей, которые более удалены от ТС, дают большую точность при определении КЛП. Однако по мере удаления от ТС возрастает и вероятность изменения скорости дрейфа. Поэтому выбор особенности каждый раз является здесь предметом компромисса: на сканах небольшого размера можно использовать все особенности, а на больших частью особенностей иногда следует “пожертвовать” (см. раздел 3.1.1).

Таким образом, представляя всю совокупность особенностей её “центром масс” с координатами (x_1, y_1) и (x_2, y_2) в соответствующем ВСИ, с учётом преобразований (1) уравнения (2) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} m_x - x_1 + (K1_x - 1)\{m_x - x_1 + [(k+1)m_x + 1](m_y - y_1)\} &= x_2 + (K2_x - 1)\{x_2 + [(k+1)m_x + 1]y_2\} \\ m_y - y_1 + (K1_y - 1)\{m_x - x_1 + [(k+1)m_x + 1](m_y - y_1)\} &= y_2 + (K2_y - 1)\{x_2 + [(k+1)m_x + 1]y_2\} \end{aligned} \quad (3)$$

Связь между коэффициентами $K1$ и $K2$ во встречно-сканированных изображениях очень простая

$$\begin{aligned} K2_x &= 2 - K1_x, \\ K2_y &= 2 - K1_y, \\ K2_z &= 2 - K1_z. \end{aligned} \quad (4)$$

Если один из коэффициентов пары растягивает изображение, то другой сжимает и наоборот. Если один из коэффициентов транслирует изображение без искажения, т. е. равен 1 (дрейф отсутствует), то и другой коэффициент также транслирует изображение без искажения, т. е. он также равен 1.

Подставляя коэффициенты $K2_x$ и $K2_y$ из (4) в уравнения (3), находим искомые КЛП $K1_x$ и $K1_y$ 1-го изображения (поз. 3)

$$\begin{aligned} K1_x &= \frac{x_1 + x_2 - m_x}{x_2 - x_1 + m_x + [(k+1)m_x + 1](y_2 - y_1 + m_y)} + 1, \\ K1_y &= \frac{y_1 + y_2 - m_y}{x_2 - x_1 + m_x + [(k+1)m_x + 1](y_2 - y_1 + m_y)} + 1, \end{aligned} \quad (5)$$

зная которые, через соотношения (4) определяем КЛП $K2_x$ и $K2_y$ 2-го изображения. После этого, используя полученные коэффициенты, посредством преобразований (1) исправляем ВСИ 1 и 2 в латеральной плоскости (поз. 4).

Строго говоря, необходимо различать коэффициенты K_z для положительного (K_z^+) и для отрицательного (K_z^-) перепадов рельефа $\Delta\bar{z}$. Поэтому последнее выражение из (4), показывающее в общем виде связь между коэффициентами K_z ВСИ, следует представить как

$$\begin{aligned} K2_z^- &= 2 - K1_z^+, \\ K2_z^+ &= 2 - K1_z^-, \\ K2_z^- &= K1_z^-, \\ K2_z^+ &= K1_z^+. \end{aligned} \quad (6)$$

Откуда также выводятся связи: $K1_z^- = 2 - K1_z^+$, $K2_z^- = 2 - K2_z^+$.

В соответствии с определением коэффициента K_z для перепадов высот в точке (\bar{x}, \bar{y}) области перекрытия исправленных в латеральной плоскости изображений 1 и 2 (поз. 5) можно записать следующую систему уравнений

$$\begin{aligned} \Delta z_1(\bar{x}, \bar{y}) &= K1_z^+ \Delta\bar{z}(\bar{x}, \bar{y}), \\ \Delta z_2(\bar{x}, \bar{y}) &= K2_z^- \Delta\bar{z}(\bar{x}, \bar{y}), \end{aligned} \quad (7)$$

где Δz_1 , Δz_2 – искажённые перепады высоты в исправленных латерально изображениях 1 и 2, соответственно; $\Delta\bar{z}$ – истинный перепад высоты рельефа.

Подставляя в полученную линейную систему вместо $K2_z^-$ его выражение из (6), находим решения

$$\begin{aligned} K1_z^+(\bar{x}, \bar{y}) &= \frac{2\Delta z_1(\bar{x}, \bar{y})}{\Delta z_1(\bar{x}, \bar{y}) + \Delta z_2(\bar{x}, \bar{y})}, \\ \Delta\bar{z}(\bar{x}, \bar{y}) &= \frac{\Delta z_1(\bar{x}, \bar{y}) + \Delta z_2(\bar{x}, \bar{y})}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Из полученного решения для $\Delta\bar{z}$ видно, что истинный перепад высоты рельефа определяется полусуммой искажённых перепадов высот. Следует обратить внимание на то, что для разных перепадов высоты $\Delta\bar{z}$ будут получаться разные коэффициенты K_z , поскольку за время Δt выполнения латерального шага вертикальный дрейф приводит к одному и тому же смещению (коэффициент K_z , приведённый в формуле (1), соответствует перепаду $\Delta\bar{z} = 1$).

Поэтому удобнее оперировать не перепадом высоты $\Delta\bar{z}$ и соответствующим ему коэффици-

ентом K_z , а величиной вертикального смещения $(K_z - 1)\Delta\bar{z}$, одинаковой во всех точках области перекрытия. Используя формулы (8), легко определить, что вертикальное смещение равно полуразности перепадов высот Δz_1 и Δz_2 . Вертикальное смещение вычисляется в каждой точке области перекрытия, а затем усредняется.

Таким образом, искажения в вертикальной плоскости можно исправить, применяя формулу (1), в которой вместо $K_z - 1$ следует подставить полученное усреднённое вертикальное смещение. Однако данный способ коррекции не является точным, поскольку за время Δt выполнения латерального шага дрейф не успевает существенным образом исказить перепад высоты $\Delta\bar{z}$.

Для точек области перекрытия ВСИ, исправленных в латеральной плоскости (поз. 5), можно составить следующее уравнение

$$\bar{z}_1(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{z}_2(\bar{x}, \bar{y}). \quad (9)$$

Преобразования в латеральной плоскости обратные (1) выглядят так

$$\begin{aligned} x(\bar{x}, \bar{y}) &= \frac{\{(K_y - 1)[(k + 1)m_x + 1] + 1\}\bar{x} - (K_x - 1)[(k + 1)m_x + 1]\bar{y}}{K_x + (K_y - 1)[(k + 1)m_x + 1]}, \\ y(\bar{x}, \bar{y}) &= \frac{(1 - K_y)\bar{x} + K_x\bar{y}}{K_x + (K_y - 1)[(k + 1)m_x + 1]}. \end{aligned} \quad (10)$$

Используя тождество $\bar{z}(x, y) \equiv \bar{z}(\bar{x}, \bar{y})$, в котором координаты \bar{x} , \bar{y} области перекрытия связаны с координатами x , y прямоугольного растра соответствующего ВСИ преобразованиями (10), и выражение для \bar{z} из системы (1), уравнение (9) можно представить в развёрнутом виде, как

$$\begin{aligned} z_1(m_x - x_1, m_y - y_1) - (K1_z^+ - 1)\{m_x - x_1 + [(k + 1)m_x + 1](m_y - y_1)\} \\ = z_2(x_2, y_2) + (K2_z^- - 1)\{x_2 + [(k + 1)m_x + 1]y_2\} - (K1_z^+ - 1)\{m_x + [(k + 1)m_x + 1]m_y\} \end{aligned} \quad (11)$$

Смещения m_x , m_y координат x_1 , y_1 , соответственно, обеспечивают возврат из системы координат встречного изображения к системе координат прямого изображения. Знак плюс перед множителем $(K2_z^- - 1)$ стоит потому, что знак перепада $\Delta\bar{z}$ на встречном изображении противоположен знаку перепада $\Delta\bar{z}$ на прямом изображении (здесь $|\Delta\bar{z}| = 1$). Слагаемое $(K1_z^+ - 1)\{m_x + [(k + 1)m_x + 1]m_y\}$ в правой части уравнения (11) учитывает вертикальное смещение начала координат встречного изображения, которое произошло за время сканирования прямого изображения.

Из уравнения (11), используя связь (6) между коэффициентами $K1_z$ и $K2_z$, легко выразить коэффициент $K1_z$ в виде

$$K1_z^+ = \frac{z_2(x_2, y_2) - z_1(m_x - x_1, m_y - y_1)}{x_1 + x_2 + [(k + 1)m_x + 1](y_1 + y_2)} + 1, \quad (12)$$

который вычисляется для всех точек (\bar{x}, \bar{y}) области перекрытия, а затем усредняется (поз. 6). Зная коэффициент K_z , исправляем каждое изображение в вертикальной плоскости согласно выражению для \bar{z} преобразований (1) (поз. 7).

Наконец, совмещаем полученные изображения в точке совмещения и усредняем рельеф в области перекрытия (поз. 8). Таким образом, на выходе имеем исправленное изображение поверхности, в котором устранены искажения, вызываемые x , y и z дрейфами, а также уменьшен уровень зашумлённости.

2.1.2. Распознавание особенностей

Поиск особенностей в ВСИ и определение их латеральных координат можно выполнить вручную, однако использование для этих целей процедуры распознавания [6, 9] позволяет полностью автоматизировать процесс получения неискажённых дрейфом СЗМ-изображений. В качестве особенностей в применяемой процедуре распознавания используются элементы рельефа типа "холм" или "яма". Поскольку особенности поверхности определены в самом общем виде, то в большинстве встречающихся на практике случаев на изображении удаётся обнаружить подходящую особенность.

Процедура распознавания может работать как отдельно только с холмами или только с ямами, так и с холмами и с ямами одновременно. Из соображений повышения точности определения КЛП, следует стараться использовать последний из перечисленных режимов, так как в этом слу-

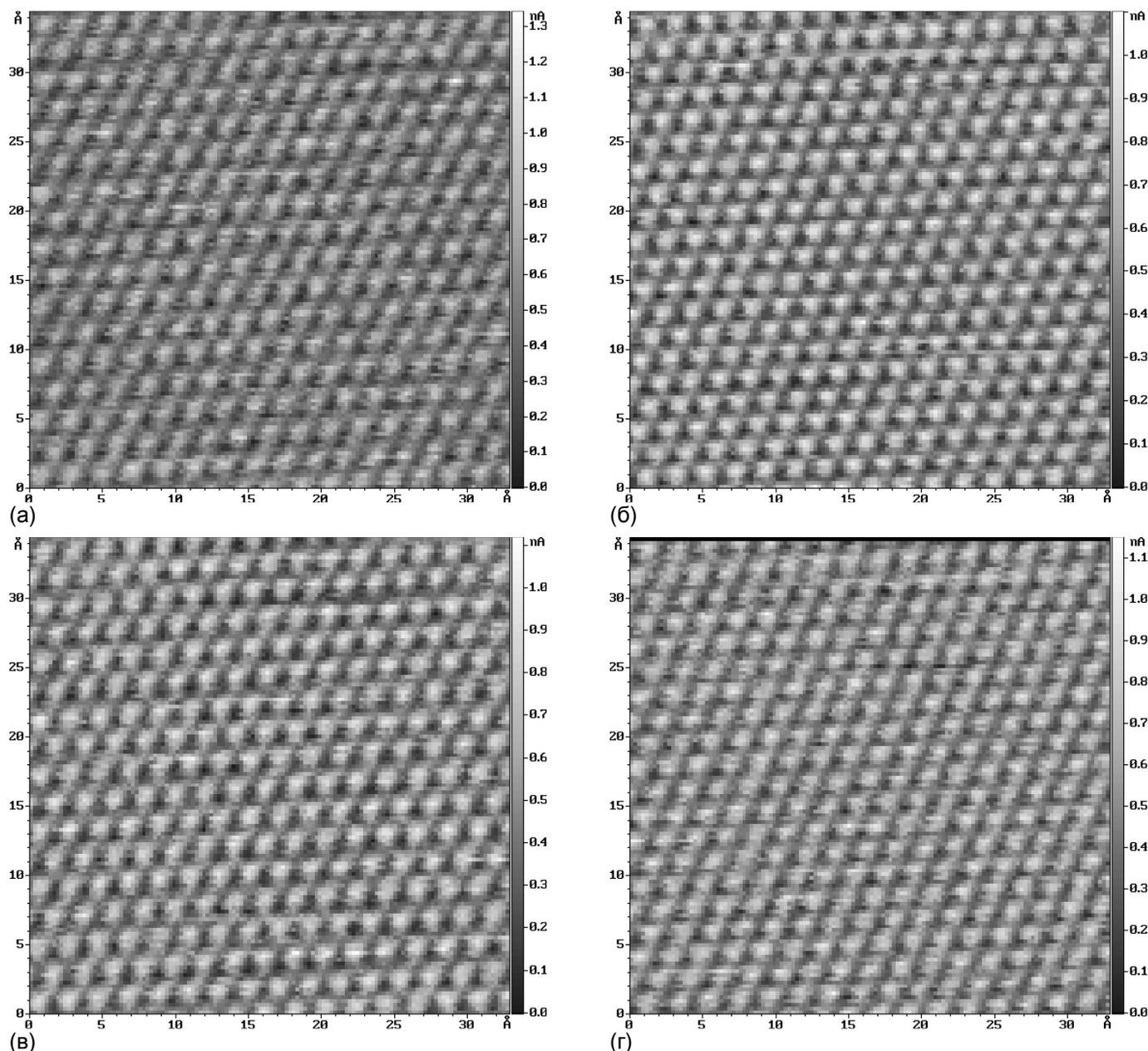


Рис. 3. Искажённые дрейфом ВСИ атомной поверхности пиролитического графита. (а), (б) 1-ая пара ВСИ. (в), (г) 2-ая пара ВСИ. Режим измерений: СТМ, постоянная высота, $U_{\text{мун}}=85$ мВ, $I_{\text{мун}}=750$ пА. Число точек в растре $m_x=m_y=127$. Размер шага при сканировании: $\Delta_x=0.257$ Å, $\Delta_y=0.269$ Å. Число усреднений в точке раstra 15. Скорость сканирования $v_x=v_y=187.6$ Å/с (определена в процессе тренировки, $k=1$). Время сканирования 1 мин 29 с.

чае число задействованных особенностей максимально.

В качестве координат положения особенности выступают координаты “центра тяжести” особенности, что, учитывая линейный характер искажений, вполне допустимо. Перед выполнением распознавания рекомендуется удалить средний наклон поверхности, а также сгладить картинку. Заметим, что подобные манипуляции производятся исключительно над дубликатами изображений, над оригиналами производится только коррекция дрейфа.

Поскольку в данном способе выполняется распознавание сосканированного изображения, то особенности рельефа следует понимать в широком смысле. Физически они могут представлять собой не только рельеф, но, в зависимости от используемой разновидности зондового микроскопа, области намагниченности, места локализации электрического заряда и т. п.

2.1.3. Итеративный поиск пар особенностей

Из-за искажений, вызываемых дрейфом, позиции одних и тех же особенностей на ВСИ не совпадают, причём степень несовпадения увеличивается по мере удаления от ТС, неодинаково также количество особенностей в ВСИ (см. раздел 3). Кроме того, в результате сбоя сканирования некоторые особенности, распознанные на одном из изображений, могут оказаться нераспознанными на другом. Таким образом, после распознавания особенностей в ВСИ необходимо вы-

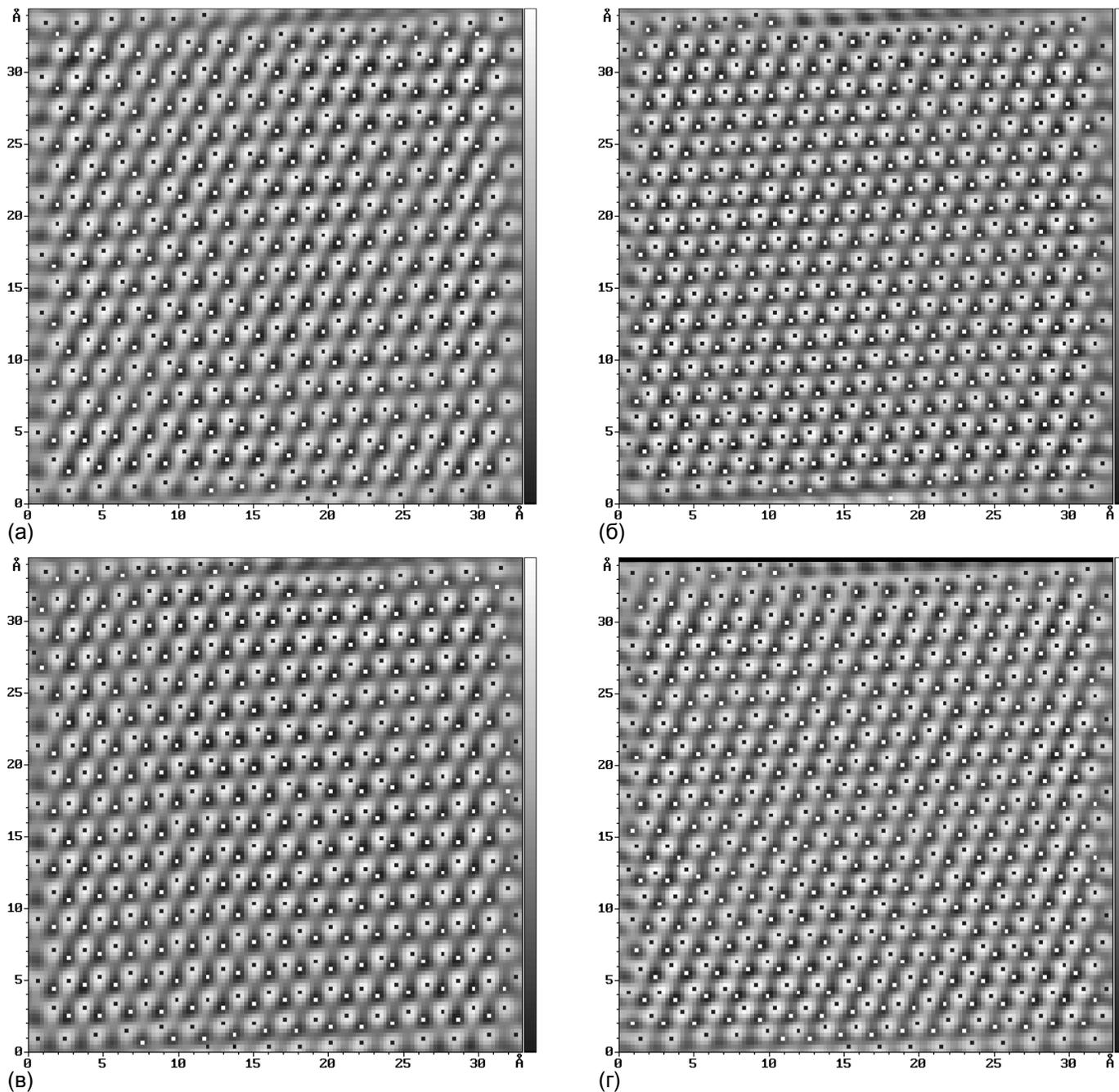


Рис. 4. Особенности поверхности, распознанные на ВСИ пиролизического графита. (а), (б) 1-ая пара ВСИ. (в), (г) 2-ая пара ВСИ. В качестве особенностей поверхности выступают и холмы (атомы углерода) и ямы (междоузлия). Перед распознаванием было выполнено сглаживание рельефа методом Фурье-фильтрации. Чёрными точками помечены распознанные атомы, а белыми точками – междоузлия. Общее количество обнаруженных особенностей: (а) 490, (б) 591, (в) 520, (г) 610. Усреднённая постоянная решётки a : (а) 2.221 Å, (б) 2.024 Å, (в) 2.220 Å, (г) 2.023 Å.

полнить следующий итеративный процесс, в ходе которого устанавливается, что некоторая особенность с координатами (x_1, y_1) на изображении 1 и некоторая особенность с координатами (x_2, y_2) на изображении 2 являются одной и той же особенностью с координатами (\bar{x}, \bar{y}) на исправленном изображении.

С этой целью из списка особенностей изображения 1 выбирается такая особенность, которая встретится первой, если двигаться от ТС вдоль траектории встречного скана. Затем, в списке особенностей изображения 2 производится поиск особенности ближайшей к выбранной на изображении 1 особенности и лежащей при этом в пределах некоторой её круговой окрестности. В процессе поиска в списке особенностей изображения 2 рассматриваются только особенности того типа (холм/яма), которому принадлежит особенность, выбранная на изображении 1. Если подходящая особенность отсутствует в списке особенностей изображения 2, то особенность, выбранная из списка особенностей изображения 1, удаляется из этого списка, и новый итерационный цикл начинается досрочно.

Таблица 1. Статистика особенностей рельефа, распознанных в ВСИ пирографита и пористого оксида алюминия.

| Образец | ВСИ | Холмы | Ямы | Всего | Усреднённая постоянная решётки a или среднее расстояние между однотипными особенностями (холмы, ямы) (Å) | Относительная погрешность измерения постоянной решётки a (%) |
|--------------------|-----|-------|-----|-------|--|--|
| ВОПГ | 1 | 261 | 229 | 490 | 2.221 | 9.9 |
| | 2 | 310 | 281 | 591 | 2.024 | 17.9 |
| | 3 | 274 | 246 | 520 | 2.220 | 9.9 |
| | 4 | 320 | 290 | 610 | 2.023 | 17.9 |
| Пористый Al_2O_3 | 1 | 117 | 62 | 179 | 398.0, 641.2 | – |
| | 2 | 67 | 30 | 97 | 518.1, 828.6 | – |
| | 3 | 115 | 58 | 173 | 399.1, 641.4 | – |
| | 4 | 64 | 32 | 96 | 516.9, 826.1 | – |

Координаты особенностей, выбираемые из списков с целью обнаружения следующей пары, предварительно исправляются посредством преобразований (1) с использованием значений промежуточных латеральных коэффициентов $K1$, $K2$, найденных в предыдущем цикле (исходные значения промежуточных коэффициентов задаются равными 1).

Обнаружив подходящую особенность в изображении 2, определяются координаты центров тяжести, отобранных на данный момент совокупностей особенностей (в случае существенного изменения скорости дрейфа следует использовать не все отобранные особенности, а только часть из них, полученную в нескольких предыдущих циклах итераций). Затем по формулам (5) находятся новые промежуточные КЛП $K1$. После чего по формулам (4) вычисляются новые промежуточные КЛП $K2$. Описанный итерационный процесс повторяется до тех пор, пока не будут проанализированы все особенности из списка особенностей изображения 1.

Поскольку в предлагаемом методе при определении КЛП выполняется совмещение центров тяжести совокупностей особенностей, обнаруженных в изображениях 1 и 2, то сумма квадратов отклонений исправленных положений особенностей будет минимальной. Преимущество приведённого алгоритма становится очевидным при его применении к состоящим из одинаковых элементов высокоупорядоченным поверхностям с малым числом дефектов, где нет иной возможности отличить одну особенность поверхности от другой.

Для успешного выявления пар особенностей необходимо стремиться, так располагать область сканирования, чтобы в окрестность ТС попадало несколько особенностей. В том случае, когда все особенности измеряемой области поверхности оказались сосредоточены в нижней части ВСИ и, вдобавок, слабо различимы между собой по размерам, форме и по взаимному расположению, то для безошибочного выявления пар особенностей следует повторить встречное сканирование, но не снизу-вверх \rightarrow сверху-вниз, как изображено на Рис. 1, а сверху-вниз \rightarrow снизу-вверх.

2.2. Линейный метод исправления дрейфа по двум парам встречно-сканированных изображений

Точность исправления рельефа поверхности можно улучшить, если использовать режим коррекции дрейфа по двум парам ВСИ. Для этого скорость обратного хода в строке задаётся равной скорости прямого хода ($k=1$), а сканирование выполняется по траектории, показанной на Рис. 1б. Выполнив поиск КЛП так, как это было описано ранее, производится коррекция изображений каждой пары (см. Рис. 2б, поз. 2-8).

Если погрешность совмещения 1-ой пары изображений мала, т. е. микроскоп дрейфует с практически постоянной скоростью, то определение коэффициентов 2-ой пары может быть упрощено, поскольку справедливы следующие равенства $K3_x=2-K1_x$, $K3_y=K1_y$, $K3_z^+=K1_z^+$. Обратное

утверждение также верно. Приведённые равенства могут служить для дополнительной проверки правильности работы предложенной схемы исправления дрейфа. Так, если коэффициент $K1_x < 1$, то $K3_x > 1$, а если $K1_x > 1$, то $K3_x < 1$ (см. раздел 3). Если $K1_y < 1$, то и $K3_y < 1$, а если $K1_y > 1$, то и $K3_y > 1$ (для K_z действуют аналогичные соотношения).

Полученная пара исправленных изображений снова совмещается, а рельеф в месте наложения изображений усредняется (поз. 9), что приводит к дополнительному уменьшению уровня шума. Так как точки совмещения у каждой пары ВСИ разные (см. Рис. 1б), то совмещение исправленных картинок выполняется путём совмещения центров тяжести особенностей (при зашумленности изображений здесь также “работает” критерий минимума суммы квадратов отклонений). Перед вычислением позиций центров тяжести из списков особенностей следует исключить особенности, обнаруженные в одной паре ВСИ, но отсутствующие в другой.

2.3. Определение x, y, z составляющих скорости дрейфа

Если КЛП K_x, K_y, K_z известны, то средняя скорость \bar{v} соответствующих компонентов дрейфа определяется по формулам

$$\begin{aligned} \bar{v}_x &= (K_x - 1)\Delta_x / \Delta t = (K_x - 1)v_x, \\ \bar{v}_y &= (K_y - 1)\Delta_y / \Delta t = (K_y - 1)v_y, \\ \bar{v}_z &= (K_z - 1)\Delta_z / \Delta t, \end{aligned} \tag{13}$$

где Δ_z – минимальное изменение длины Z манипулятора. Располагая составляющими дрейфа \bar{v}_x, \bar{v}_y , можно найти модуль вектора дрейфа в латеральной плоскости $|\bar{v}_{xy}| = \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2}$.

Скорость вертикального дрейфа \bar{v}_z можно также определить, воспользовавшись следующим способом. Запишем последний член последнего уравнения преобразований (1) для точки с координатами (m_x, m_y) . Найденная величина соответствует подъёму/снижению рельефа, который произошёл вследствие действия вертикальной составляющей дрейфа за время сканирования t всего изображения (прямого или встречного). Вычисляя отношение полученной величины к времени сканирования, определяем среднюю скорость вертикального дрейфа

$$\bar{v}_z = \frac{(K_z - 1)\Delta_z \{m_x + [(k + 1)m_x + 1]m_y\}}{t}. \tag{14}$$

Сравнивая формулы (13) и (14), можно записать следующее тождество $m_x + [(k + 1)m_x + 1]m_y \equiv t\Delta t^{-1}$, в котором величины слева и справа от знака тождества это общее количество шагов в растре.

В целом, третий способ нахождения скорости вертикальной составляющей дрейфа состоит в измерении разности высот между последней и первой точками прямого скана, измерении разности высот между последней и первой точками встречного скана, вычислении полусуммы полученных разностей и последующего деления найденного значения на время сканирования t одного изображения (вычисление полусуммы позволяет исключить собственный средний наклон поверхности).

Поскольку в ВСИ последняя точка встречного скана из-за действия латеральных составляющих дрейфа не совпадает с первой точкой прямого скана, то чтобы исключить влияние рельефа на получаемый результат, следует, используя метод наименьших квадратов, заменить рельеф каждого ВСИ средней плоскостью, после чего определить указанные разности высот по данным плоскостям.

При проведении средних плоскостей нужно использовать только точки области перекрытия, поскольку в ней рельеф представлен одними и теми же особенностями. Не следует вычислять разность высот непосредственно по рельефу области перекрытия, поскольку вызываемые дрейфом искажения в этой области происходят на прямом и на встречном участках за разное время.

Преимуществом описанного способа является то, что для оценки скорости вертикального дрейфа \bar{v}_z здесь не нужно знать коэффициент K_z . Более того, в соответствии с формулой (13) (или с формулой (14)) сам коэффициент может быть найден по значению этой скорости.

2.4. Нелинейные методы исправления дрейфа

Для сканов поверхности, характеризующихся большим числом достаточно равномерно распределённых по площади изображения особенностей, можно предложить следующий способ нелинейной коррекции. Вначале, используя изложенный линейный подход, определяют пары особенностей ВСИ; затем по каждой паре вычисляют локальные КЛП K_x, K_y . В результате получается

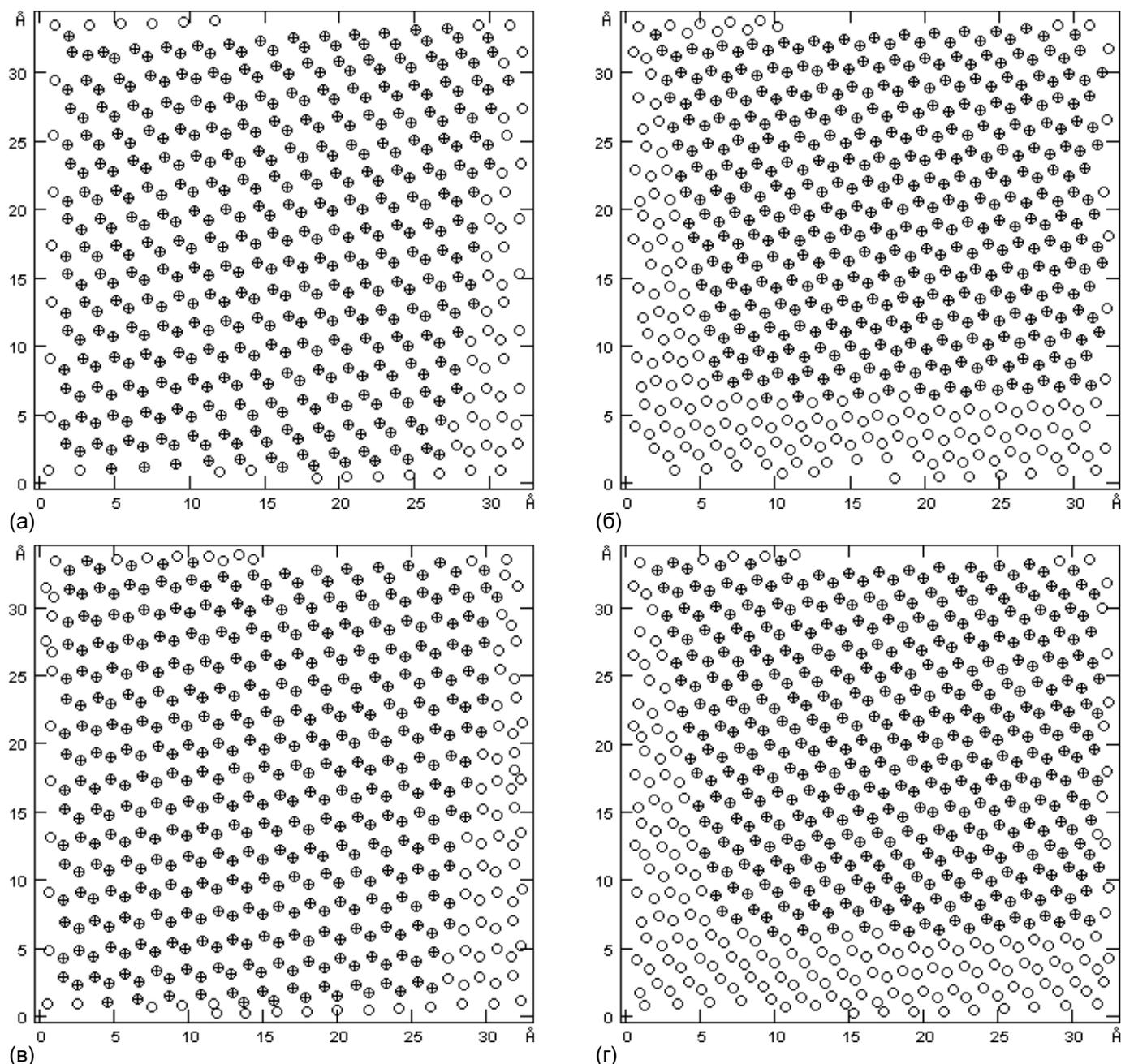


Рис. 5. Обнаружение пар особенностей в ВСИ пиролитического графита. Кружками обозначены все особенности поверхности, распознанные в изображении, а плюсами только те из них, что имеют пару в соответствующем встречном изображении. (а), (б) 1-ая пара ВСИ, имеет 424 общие особенности. (в), (г) 2-ая пара ВСИ, содержит 430 общих особенностей. Итеративный процесс начинается в ТС и распространяется далее вдоль траектории сканирования встречного изображения. В ходе итеративного процесса парные особенности обнаруживались исключительно по близости их положения в промежуточном изображении, исправленном с помощью промежуточных КЛП. Выявленные в ВСИ пары особенностей соответствуют одной и той же особенности на исправленном изображении и служат для вычисления КЛП. Особенности, отстоящие от краёв скана менее чем на 1 Å, были пропущены, для того чтобы ослабить негативное влияние краевых нелинейных искажений на результаты вычисления КЛП. Вызванная дрейфом максимальная относительная погрешность измерений в латеральной плоскости δ_{max} : (а), (б) 7.8%; (в), (г) 8.0%.

распределение, в котором каждой особенности с координатами x, y сопоставлены свои латеральные КЛП $K_x(x, y), K_y(x, y)$.

Используя преобразования (1), для каждой особенности изображения с действительными координатами x, y находят локальные смещения $D_x(x, y) = \bar{x}(x, y) - x, D_y(x, y) = \bar{y}(x, y) - y$ в латеральной плоскости. Проводя через полученные смещения регрессионные поверхности, определяют смещения, соответствующие целочисленным координатам точек искажённого изображения. Наконец, прикладывая к точкам искажённого СЗМ-изображения соответствующие им локальные смещения, получают изображение, исправленное в латеральной плоскости.

Для того чтобы выполнить коррекцию дрейфа в вертикальной плоскости необходимо совмес-

Таблица 2. Коэффициенты линейных преобразований для искажённых дрейфом ВСИ пирографита и пористого оксида алюминия.

| Образец | ВСИ | K_x | K_y | K_z^+ |
|-----------------------|-----|-----------|-----------|----------|
| ВОПГ | 1 | 0.9997155 | 0.9996909 | – |
| | 3 | 1.0003653 | 0.9997057 | – |
| Пористый Al_2O_3 | 1 | 1.000127 | 1.001523 | 1.032365 |
| | 3 | 1.000276 | 1.001491 | 1.034608 |

тить ВСИ, исправленные в латеральной плоскости, путём совмещения центров тяжести используемых наборов особенностей. Вычисляя локальный коэффициент K_z , а затем разность между исправленной высотой рельефа и искажённой в каждой точке (\bar{x}, \bar{y}) области перекрытия ВСИ, находим распределение локальных смещений по полю изображения в вертикальной плоскости $D_z(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{z}(\bar{x}, \bar{y}) - z(\bar{x}, \bar{y})$. Проводя через найденные локальные смещения регрессионную поверхность, определяется рабочее распределение, с помощью которого выполняется нелинейная коррекция изображения в вертикальной плоскости.

Построение поверхностей регрессии позволяет также ослабить влияние погрешностей в определении латерального положения особенности и высоты рельефа на результаты нелинейной коррекции. Выбор порядка регрессионной поверхности производится по остаточному рассовмещению положений особенностей (высот рельефа). Принимается тот порядок, который приводит к минимальному рассовмещению. В случае сильных нелинейных искажений регрессионные поверхности можно также использовать при итеративном поиске пар особенностей.

Можно предложить ещё одну схему нелинейной коррекции. Вокруг особенности на каждом исправленном изображении вырезается некоторая квадратная окрестность (сегмент); после чего вырезанные фрагменты рельефа помещаются в позицию, являющуюся средним исправленных позиций этой особенности в соответствующем ВСИ. Коррекция изображений и позиций особенностей может проводиться как линейным, так и нелинейным способами, описанными выше. В местах наложения сегментов рельеф усредняется. Таким образом, помимо усреднения в вертикальной плоскости, исправленный рельеф будет приближен к истинному за счёт усреднения позиций особенностей.

Обоснованием изложенных методов нелинейной коррекции является то, что истинное положение особенности находится где-то на отрезке между исправленными положениями особенности и, скорее всего, тяготеет к середине.

2.5. Исправление искажённых дрейфом сегментов рельефа в методе особенность-ориентированного сканирования

Наибольший эффект от применения описанного способа коррекции дрейфа достигается при его использовании в методе ООС [6], поскольку в этом случае появляется возможность исправления дрейфа в изображениях практически любого размера. Дело в том, что, начиная с определённого размера скана, обязательно нарушается основное предположение о неизменности скорости дрейфа в течение времени сканирования (см. раздел 3). Хотя точно такое же предположение должно выполняться и для сканов, получаемых по методу ООС, но там возникающее противоречие устраняется благодаря тому, что большая площадь сканируется по частям – малыми сегментами (квадратными окрестностями особенностей поверхности), а все перемещения происходят на короткие расстояния от одной особенности к другой, расположенной по соседству.

Чтобы окончательно убедиться в сказанном, следует сравнить время выполнения скана атомарной поверхности графита размером $(35 \times 35) \text{ \AA}^2$ (см. раздел 3.1), которое составляет около 1.5 мин, с временем сканирования-распознавания сегментов размерами $(4.5 \times 4.5) \text{ \AA}^2$ “Следующего” и “Текущего” атомов углерода в одном цикле скиппинга, которое составляет около 300 мс [6]. Скиппинг – это элементарная измерительная операция в ООС, предназначенная для точного определения относительных координат соседних особенностей и получения сегментов рельефа.

При переходе от атомного масштаба к поверхностям с характерными размерами особенностей и расстояниями между ними в десятки и сотни нанометров внешнее проявление на изображении термосоставляющей дрейфа ослабевает, а нелинейной составляющей от ползучести, напротив,

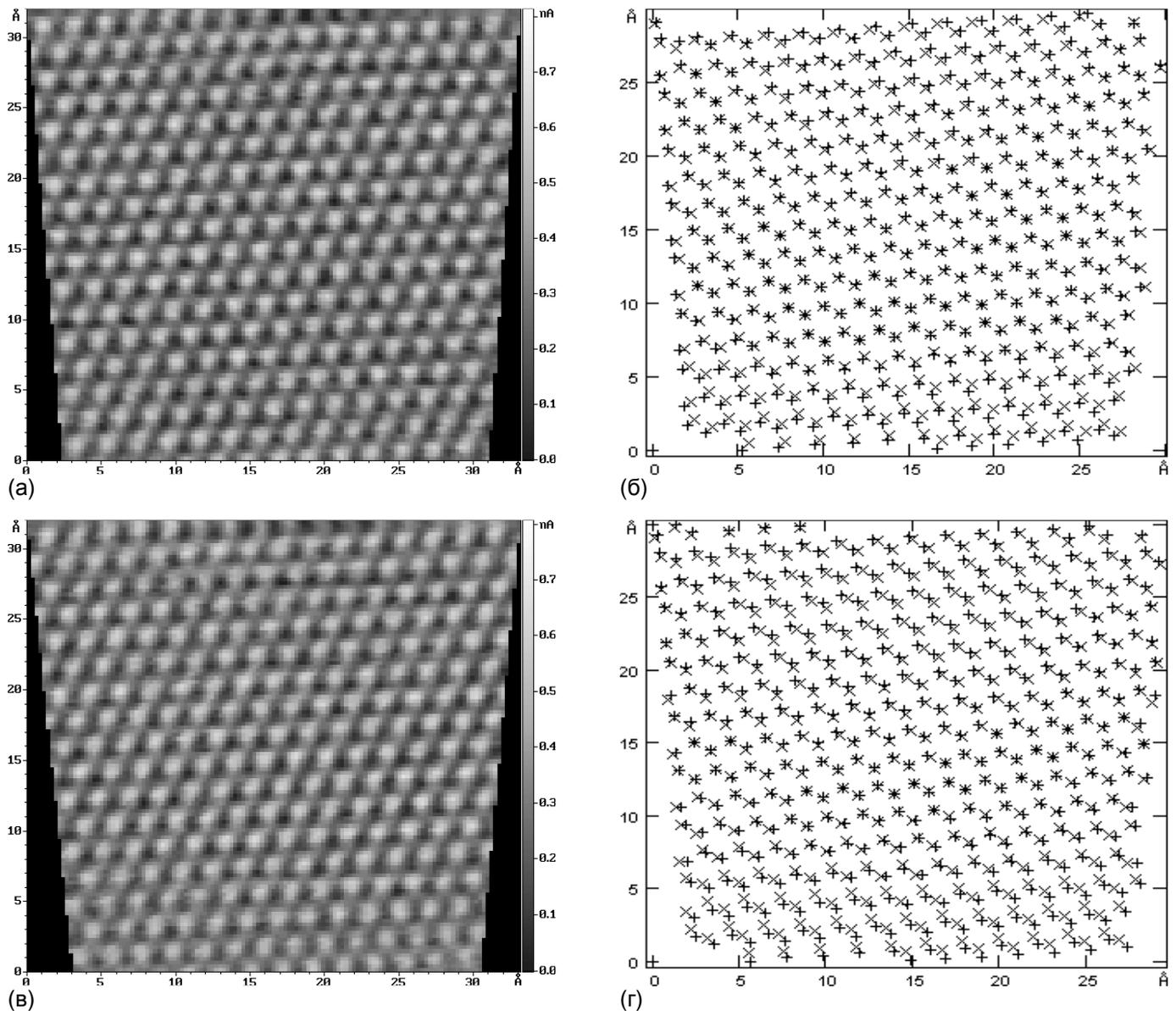


Рис. 6. Исправленные ВСИ пиролитического графита: (а) 1-ая пара; (в) 2-ая пара. ВСИ каждой пары были скорректированы в латеральной плоскости посредством линейных преобразований (1), затем совмещены в соответствующей ТС и усреднены в области перекрытия. Исправленные положения особенностей после совмещения ВСИ: (б) 1-ая пара; (г) 2-ая пара. Значком “+” обозначены исправленные позиции особенностей прямого изображения, а значком “x” – встречного. Среднее значение остаточного рассовмещения Δ : (а), (б) 0.22 Å; (в), (г) 0.30 Å. Средняя погрешность по полю изображения δ : (а), (б) 0.2%; (в), (г) 0.3%.

усиливается (см. раздел 4). Несмотря на это, измеряя рельеф по частям небольшими сегментами, а также используя взаимно-встречные перемещения зонда в апертурах (апертурой называется вспомогательный скан окрестности текущей особенности, вмещающий несколько соседних особенностей), в сегментах, между соседними особенностями (скиппинг) и при движении по строкам из особенностей, которые образуют целую иерархию встречных перемещений, возможно значительно ослабить негативное действие ползучести [6].

Кроме того, в случае заметного изменения скорости дрейфа, мониторинг которой при ООС производится непрерывно, процесс измерения автоматически приостанавливается, испорченные локальные данные отбрасываются, и микроскоп, выполняя периодическую привязку зонда к текущей особенности поверхности или вводя холостые циклы скиппинга, ждёт, пока скорость дрейфа не стабилизируется. Как только скорость дрейфа стабилизировалась, работа возобновляется с того, что заново выполняется прерванное забракованное локальное измерение. Таким образом, в результате применения указанной совокупности приёмов суммарный дрейф снова оказывается медленно изменяющимся процессом и, следовательно, также поддаётся линеаризации.

Следует обратить внимание на то, как просто при ООС происходит обнаружение одной и той же особенности в ВСИ. Дело в том, что сегмент, как правило, вмещает только одну особенность. В тех случаях, когда сегмент содержит несколько особенностей (обычно две-три), особенности,

Таблица 3. Погрешности исправления ВСИ пирографита и пористого оксида алюминия: минимальное Δ_{min} , максимальное Δ_{max} и среднее Δ латеральные рассовмещения особенностей; среднее рассовмещение Δ_{\perp} в вертикальной плоскости; максимальная δ_{max} и средняя по полю изображения δ относительные погрешности в латеральной плоскости. Первое значение погрешности получено при применении линейной коррекции, а второе – нелинейной.

| Образец | Исправленные ВСИ | Число n общих особенностей | Δ_{min} (Å) | Δ_{max} (Å) | Δ (Å) | Δ_{\perp} (Å) | δ_{max} (%) | δ (%) |
|--------------------|--|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------------|--------------------|--------------|
| ВОПГ | $\overline{1\ 0\ 2}$ | 424 | 0.002, 0.003 | 0.677, 0.392 | 0.221, 0.072 | – | 0.8, 0.6 | 0.23, 0.07 |
| | $\overline{3\ 0\ 4}$ | 430 | 0.008, 0.008 | 0.713, 0.451 | 0.297, 0.096 | – | 0.9, 0.6 | 0.31, 0.10 |
| | $\overline{(\overline{1\ 0\ 2})\ 0\ (\overline{3\ 0\ 4})}$ | 422 | 0.002, 0.001 | 0.253, 0.248 | 0.050, 0.048 | – | 0.2, 0.4 | 0.05, 0.05 |
| Пористый Al_2O_3 | $\overline{1\ 0\ 2}$ | 88 | 15.2, 1.3 | 445.9, 65.4 | 165.5, 18.9 | 56.4, 37.3 | 2.8, 0.9 | 1.5, 0.16 |
| | $\overline{3\ 0\ 4}$ | 85 | 11.9, 1.8 | 414.9, 63.6 | 157.5, 18.5 | 55.7, 37.6 | 3.1, 0.8 | 1.4, 0.15 |
| | $\overline{(\overline{1\ 0\ 2})\ 0\ (\overline{3\ 0\ 4})}$ | 84 | 0.6, 0.2 | 77.5, 57.6 | 30.6, 22.3 | 20.4, 42.4 | 0.8, 0.6 | 0.2, 0.14 |

расположенные ближе остальных к центрам ВСИ, будут соответствовать одной и той же текущей особенности в исправленном сегменте, поскольку основным признаком текущей особенности в сегменте является её близость к центру квадратного раstra [6].

Распознавание двух/четырёх ВСИ может производиться одновременно. Распознавание особенностей типа холм и особенностей типа яма на каждом изображении также может выполняться одновременно [6]. Кроме того, процесс распознавания прямых изображений и процесс сканирования встречных изображений могут быть совмещены во времени. Таким образом, производительность вычислений может быть существенным образом увеличена применением двух/четырех процессорного компьютера. Наибольшая выгода от использования многопроцессорного компьютера возникает при использовании встречного сканирования в методе ООС, где распознавание

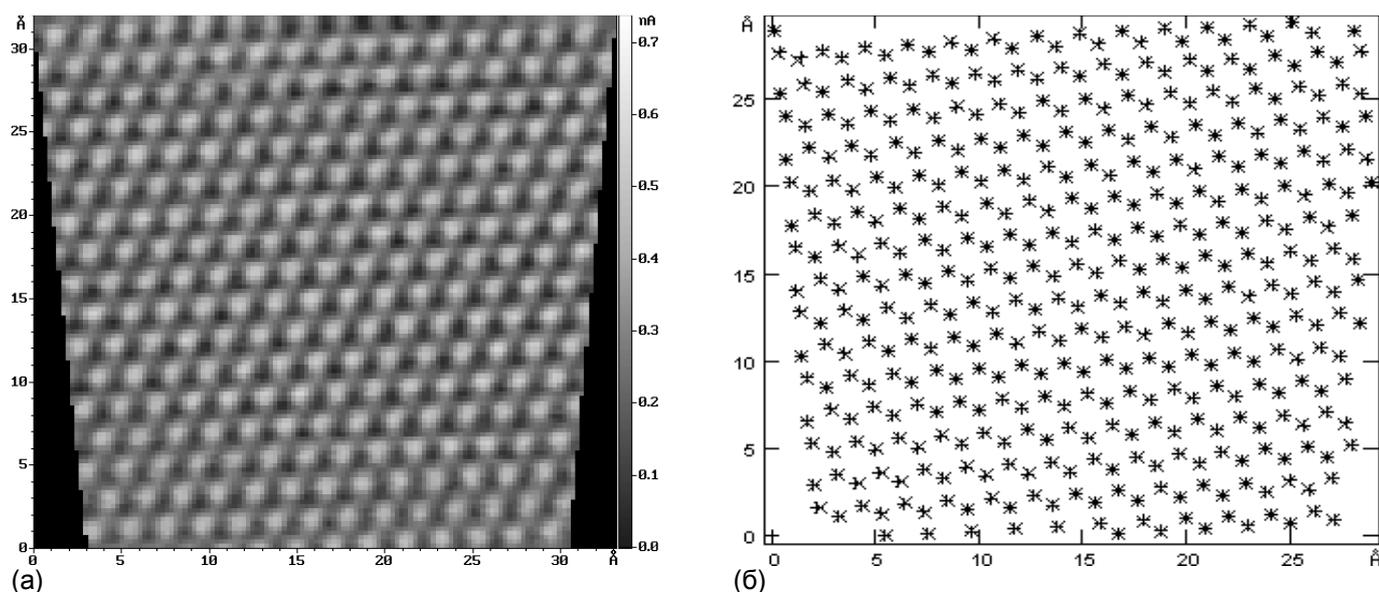


Рис. 7. Совмещённые в одно изображение исправленные пары ВСИ пиролитического графита: (а) рельеф поверхности, (б) взаимные положения особенностей. Значком “+” обозначены исправленные усреднённые позиции особенностей 1-ой пары ВСИ, а значком “x” – 2-ой пары ВСИ. Совмещение изображений посредством совмещения центра тяжести множества особенностей “+” с центром тяжести множества особенностей “x” происходит с минимальной среднеквадратической погрешностью. Количество общих особенностей в совмещённых парах ВСИ – 422. Средняя величина рассовмещения $\Delta=0.05$ Å. Средняя погрешность по полю изображения $\delta=0.05\%$.

должно осуществляться в реальном масштабе времени.

Отметим в заключение, что при непосредственном применении описанной методики исправления дрейфа число усреднений изображения ограничено и не может быть больше 4, а вот при её использовании в методе ООС, напротив, нет никаких ограничений на количество усреднений изображений (сегментов).

3. Экспериментальные результаты

Для проверки работоспособности предложенного метода коррекции дрейфа было проведено встречное сканирование атомарной поверхности высокоориентированного пиролиитического графита (ВОПГ) и пористой поверхности оксида алюминия. Измерение поверхности графита выполнено на сканирующем туннельном микроскопе (СТМ), измерение поверхности оксида алюминия – на атомно-силовом микроскопе (АСМ). В обоих случаях использовался СЗМ Solver™ Р4 (изготовитель НТ-МДТ), измерения производились на воздухе путём перемещения образца относительно неподвижного зонда.

Непосредственно перед началом сканирования выполнялось несколько десятков “тренировочных” проходов зонда по 1-ой строке растра для того, чтобы обеспечить более плавный перевод пьезоманипуляторов из состояния покоя в состояние сканирования. Используя данный приём, можно заметно уменьшить искажения, вызываемые ползучестью в начале скана. В процессе тренировки также определялась фактическая скорость сканирования v_x . Распознавание особенностей в ВСИ выполнено в ходе виртуального ООС [6].

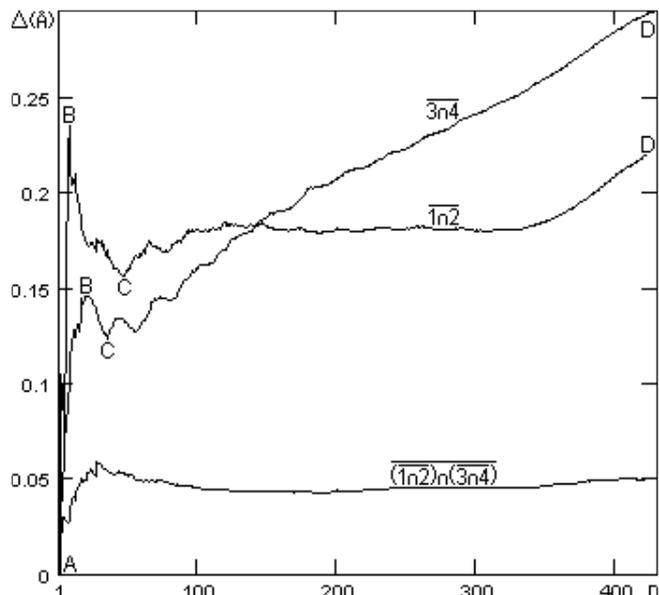


Рис. 8. Зависимость среднего взаимных расстояний исправленных позиций пар особенностей от порядкового номера пары. Номера присваиваются особенностям последовательно согласно пути, пройденному от ТС до особенности вдоль траектории встречного скана.

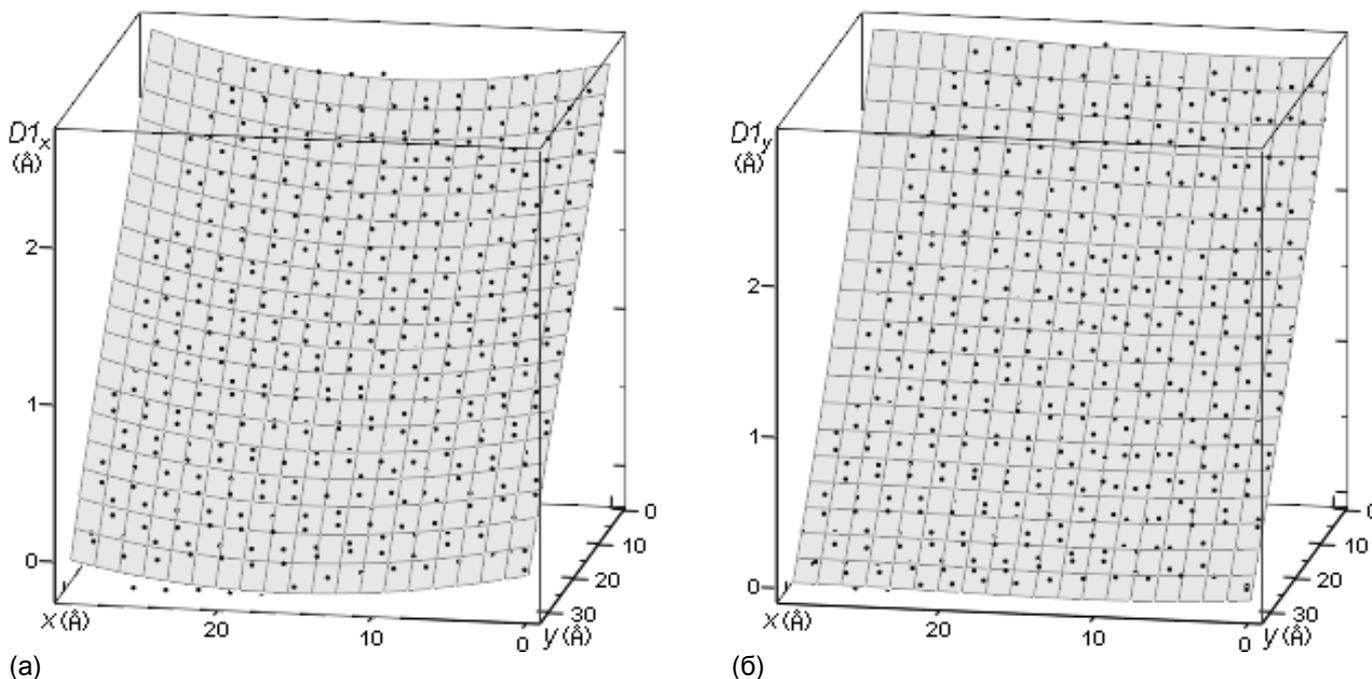


Рис. 9. Регрессионные поверхности 3-го порядка, проведённые через локальные (а) D_x смещения, (б) D_y смещения особенностей 1-го ВСИ. Локальное смещение особенности (изображено точкой) определяется как разность между исправленной позицией особенности и искажённой. Для того чтобы найти исправленную позицию особенности вычисляются локальные КЛП $K_x(x, y)$, $K_y(x, y)$. Регрессионные поверхности обеспечивают плавный переход от локальных смещений, соответствующих действительным координатам особенностей, к локальным смещениям, соответствующим целочисленным координатам точек исправляемого изображения.

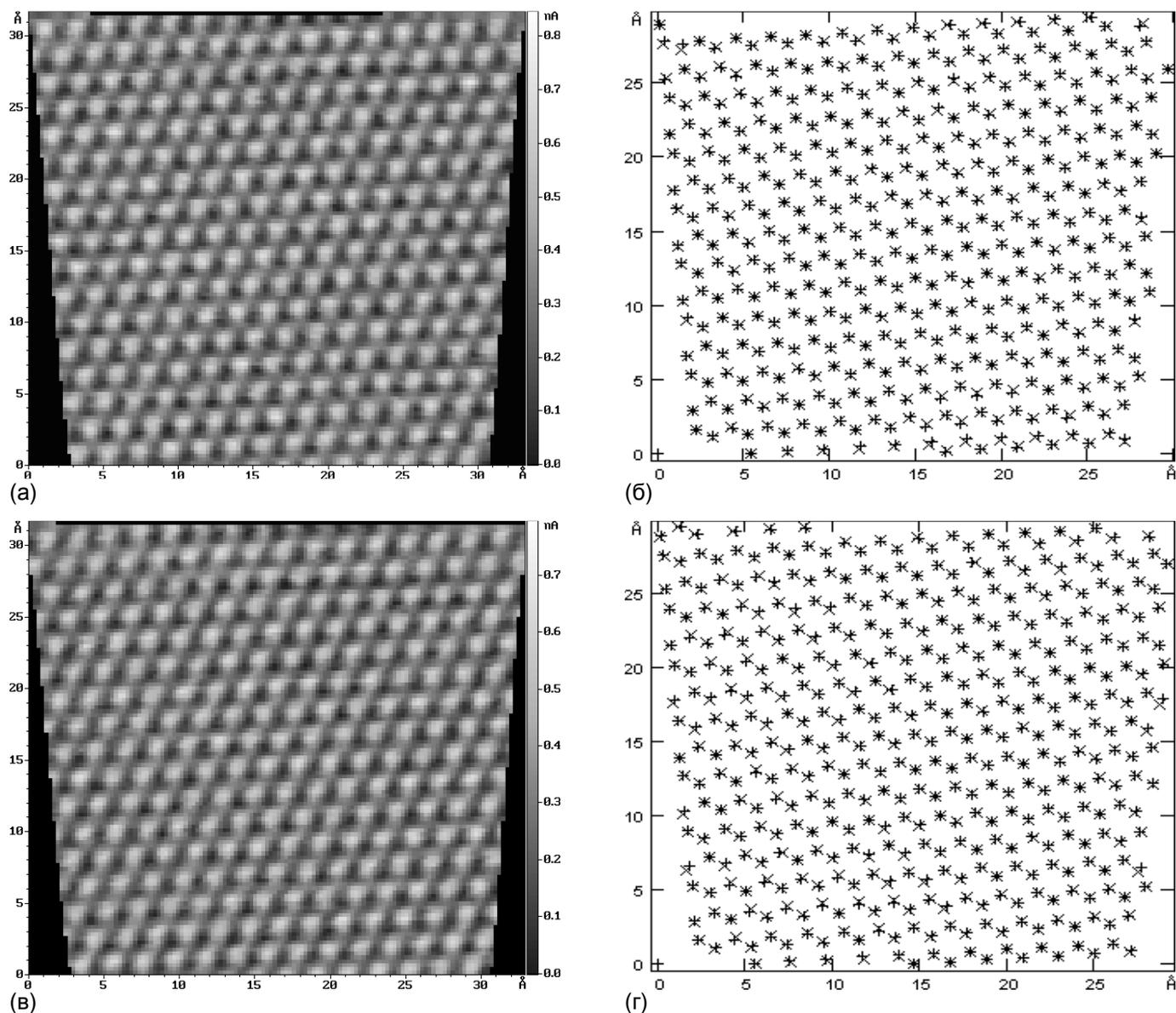


Рис. 10. ВСИ пиролитического графита после проведения нелинейной коррекции: (а) 1-ая пара; (в) 2-ая пара. ВСИ каждой пары были вначале исправлены в латеральной плоскости посредством смещений D_x , D_y , определяемых по регрессионным поверхностям; затем совмещены по центрам тяжести используемых множеств особенностей, после чего усреднены в области перекрытия. Исправленные положения особенностей после совмещения ВСИ: (б) 1-ая пара; (г) 2-ая пара. Среднее значение остаточного рассовмещения Δ : (а), (б) 0.072 Å; (в), (г) 0.096 Å. Средняя погрешность по полю изображения δ : (а), (б) 0.07%; (в), (г) 0.10%. В отличие от линейной коррекции размытость в верхней и в нижней частях изображений вследствие рассовмещения латеральных позиций особенностей отсутствует (сравните с Рис. 6).

3.1. Исправление искажённого дрейфом скана атомной поверхности пиролитического графита

На Рис. 3 показаны две пары ВСИ атомной поверхности пиролитического графита. Измерения проведены в режиме постоянной высоты после многочасового прогрева прибора под теплоизолирующим колпаком. Область сканирования располагалась вблизи начала координат сканера, где погрешности, вызываемые нелинейностью сканера, паразитными связями и ошибкой смещения Аббе – минимальные. Иглой служила механически срезанная проволока NiCr диаметром 0.3 мм. Шаги микроскопа в латеральной плоскости составляли: $\Delta_x=0.257$ Å, $\Delta_y=0.269$ Å. Число точек в ВСИ $m_x=m_y=127$. Фактическая скорость сканирования, найденная в процессе тренировки, $v_x=v_y=187.6$ Å/с ($k=1$)

На Рис. 4 показаны результаты распознавания полученных ВСИ графита. В качестве особенностей токового рельефа выступают атомы углерода (холмы) и междоузлия (ямы). В Таблице 1 для каждого ВСИ приведено количество обнаруженных в нём особенностей, а также определяемые в процессе распознавания средняя величина постоянной решётки a и относительная погрешность её измерения (номинальное значение постоянной решётки ВОПГ равно 2.464 Å).

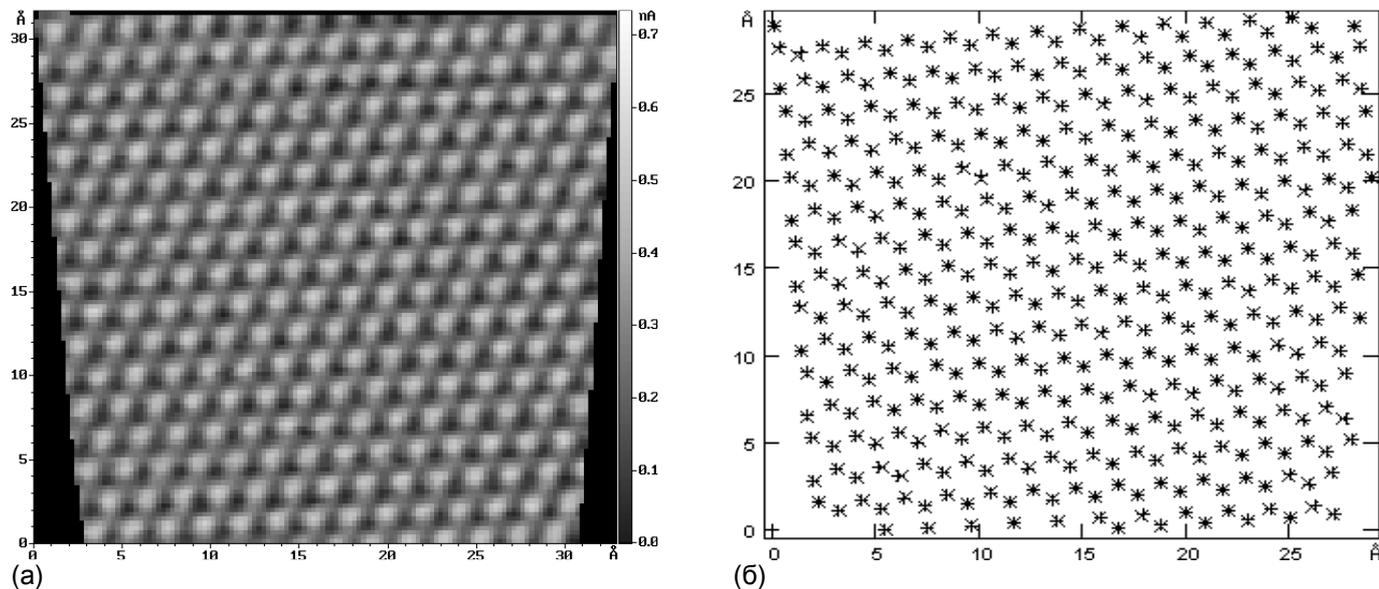


Рис. 11. Совмещённые в одно изображение исправленные нелинейным способом пары ВСИ пиролиитического графита: (а) рельеф поверхности, (б) взаимные положения особенностей. Средняя величина рассовмещения $\Delta=0.048$ Å. Средняя погрешность по полю изображения $\delta=0.05\%$.

3.1.1. Линейная коррекция дрейфа

На Рис. 5 значком “+” отмечены те особенности, которые были обнаружены на обоих ВСИ в ходе выполнения итеративного процесса поиска пар особенностей. В первой паре ВСИ обнаружено 424 общие особенности, во второй паре – 430. Находя среди обнаруженных пар пару, особенности которой располагаются на максимальном расстоянии друг от друга, например, по координате x , можно определить вызванную дрейфом абсолютную погрешность измерений в латеральной плоскости Δx_{max} . Максимальная относительная погрешность δ_{max} для одного изображения вычисляется по формуле

$$\delta_{max} = \frac{\Delta x_{max} 100\%}{2m_x \Delta_x} \quad (15)$$

Относительная погрешность по координате y вычисляется аналогично. Из двух найденных погрешностей выбирается наибольшая. Для 1-ой пары ВСИ погрешность составляет 7.8%, для 2-ой пары – 8.0%.

Полученные в результате применения предлагаемого метода латеральные КЛП приведены в Таблице 2. Поскольку чувствительность найденных КЛП к погрешности в определении положения особенности тем ниже, чем дальше особенность расположена от ТС, то, исключив из списка особенностей последнюю особенность, и, заново вычисляя коэффициенты, можно определить число значащих цифр. Расчёты показывают, что изменения в латеральных КЛП происходят в 7 цифре после запятой.

На Рис. 6а, в представлены результаты исправления дрейфа в 1-ой и 2-ой парах ВСИ. Уменьшение максимального перепада высот (см. вертикальную шкалу) на исправленных изображениях в сравнении с исходными говорит о том, что после коррекции рельеф стал более гладким (из-за остаточного рассовмещения, уменьшения уровня зашумлённости, а также из-за того, что размеры исправленной области поверхности меньше размеров исходной).

Остаточные рассовмещения исправленных положений особенностей можно визуальнo оценить по Рис. 6б, г. В численном выражении среднее рассовмещение особенностей (см. Таблицу 3) оказалось сравнимо с шагом сканирования. Заметные рассовмещения в верхней и в нижней частях изображений указывают на то, что, по-видимому, во время сканирования уже начало происходить изменение скорости дрейфа. Относительные погрешности коррекции приведены в Таблице 3.

Изображение рельефа, представленное на Рис. 7а, является результатом наложения исправленных ВСИ, показанных на Рис. 6а, в, и последующего усреднения рельефа в области перекрытия. Здесь следует обратить внимание на ещё меньший уровень шума, хотя никакого дополнительного искусственного сглаживания рельефа не производилось. Точность совмещения пар ВСИ можно визуальнo оценить по Рис. 7б, в численном выражении среднее остаточное рассовмещение исправленных позиций особенностей составляет 0.05 Å.

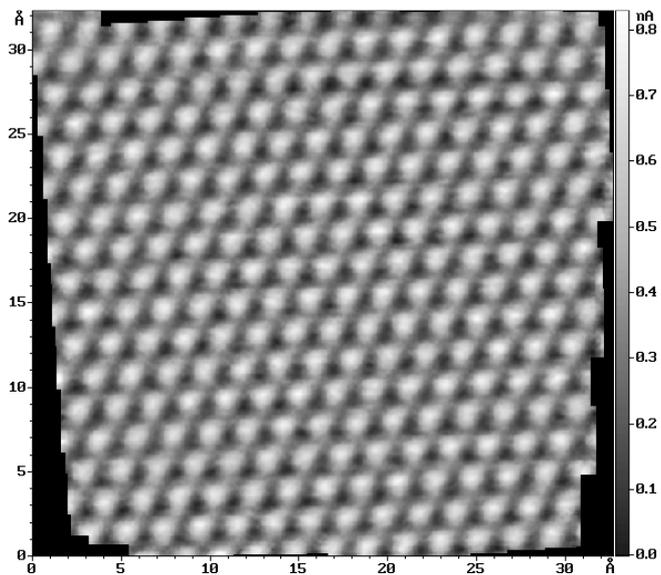


Рис. 12. Исправленное изображение поверхности пиролизического графита, собранное в ходе нелинейной коррекции из отдельных частично перекрывающихся сегментов. Размытость изображения вследствие рассовмещения латеральных позиций особенностей отсутствует (сравните с Рис. 7а), что свидетельствует о гораздо более корректном исправлении рельефа в латеральной и вертикальной плоскостях. Усреднённая постоянная решётки a равна 2.113 \AA , что соответствует относительной методической погрешности измерения 14%.

дрейфа оставалась неизменной, то погрешность по мере вовлечения новых особенностей стремилась бы к нулю. Однако на графике видно, что, достигнув некоторого минимума (точка С), погрешность начинает возрастать (участок С-Д). Таким образом, наблюдаемый рост погрешности указывает на то, что в процессе встречного сканирования скорость дрейфа изменилась.

Задавая на участке CD величину погрешности, по данным зависимостям можно определить те особенности, для которых остаточное рассовмещение не превосходит этой погрешности. После чего по найденным особенностям вычисляются КЛП, обеспечивающие исправление дрейфа с

На Рис. 8 показана найденная в процессе итеративного поиска пар особенностей зависимость среднего взаимных отклонений исправленных позиций пар особенностей Δ от порядкового номера пары n . Напомним, что каждая особенность приобретает свой номер, согласно её удалению от ТС. Причём, под удалением от ТС понимается не расстояние до особенности по прямой, а путь, проходимый вдоль встречной траектории сканирования.

Исправленные позиции первой особенности имеют нулевую погрешность совмещения (точка А), поскольку только одна эта особенность участвует в определении коэффициентов коррекции. Далее, по мере увеличения числа задействованных особенностей погрешность вначале резко возрастает (участок А-В), что связано с близостью используемых особенностей к ТС (латеральные КЛП чувствительны к относительной погрешности определения положения особенности) и с ещё недостаточно большим их количеством (погрешности в определении положений особенностей ещё не скомпенсированы усреднением), а затем довольно быстро уменьшается в результате удаления от ТС и усреднения по большему числу особенностей (участок В-С). Если бы в процессе сканирования скорость

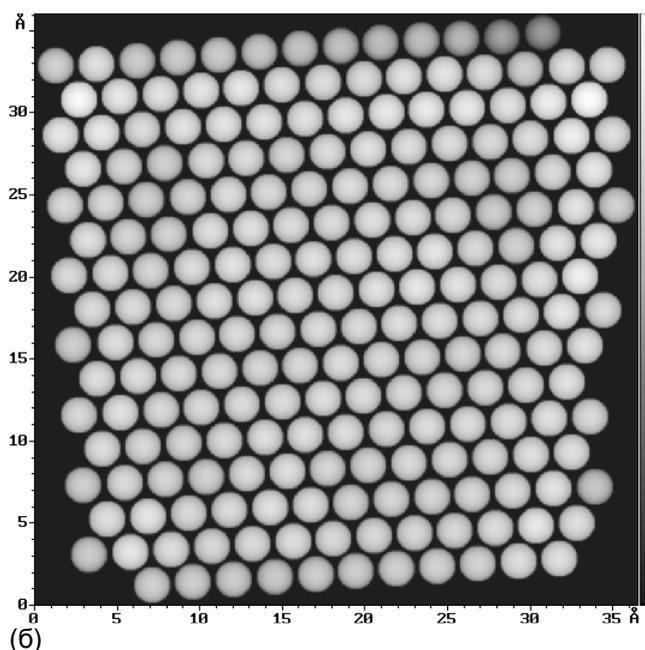
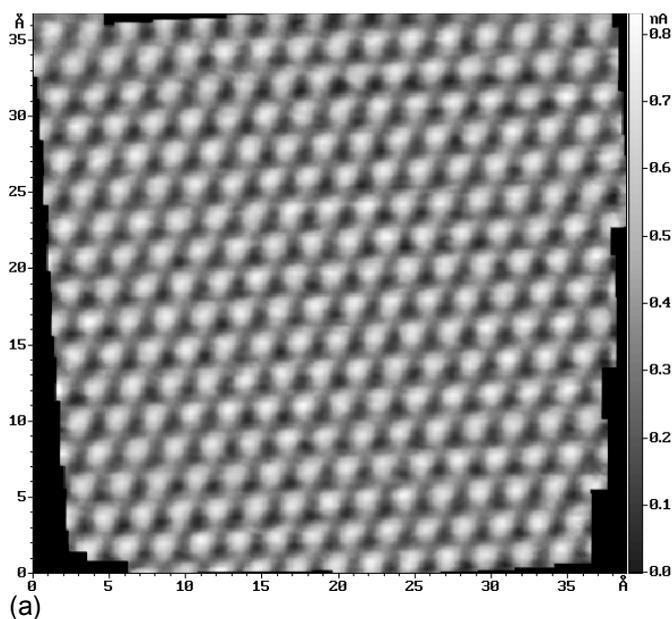


Рис. 13. Атомный рельеф пиролизического графита, полученный после коррекции систематических погрешностей масштабирования. (а) Реальное изображение поверхности. (б) Шаровая модель поверхности. Погрешности масштабирования были вызваны ошибками калибровки, выполненной ранее без учёта производимых дрейфом искажений. Усреднённая постоянная решётки a на полученных изображениях равна 2.4638 \AA , что соответствует относительной погрешности измерения 0.01%.

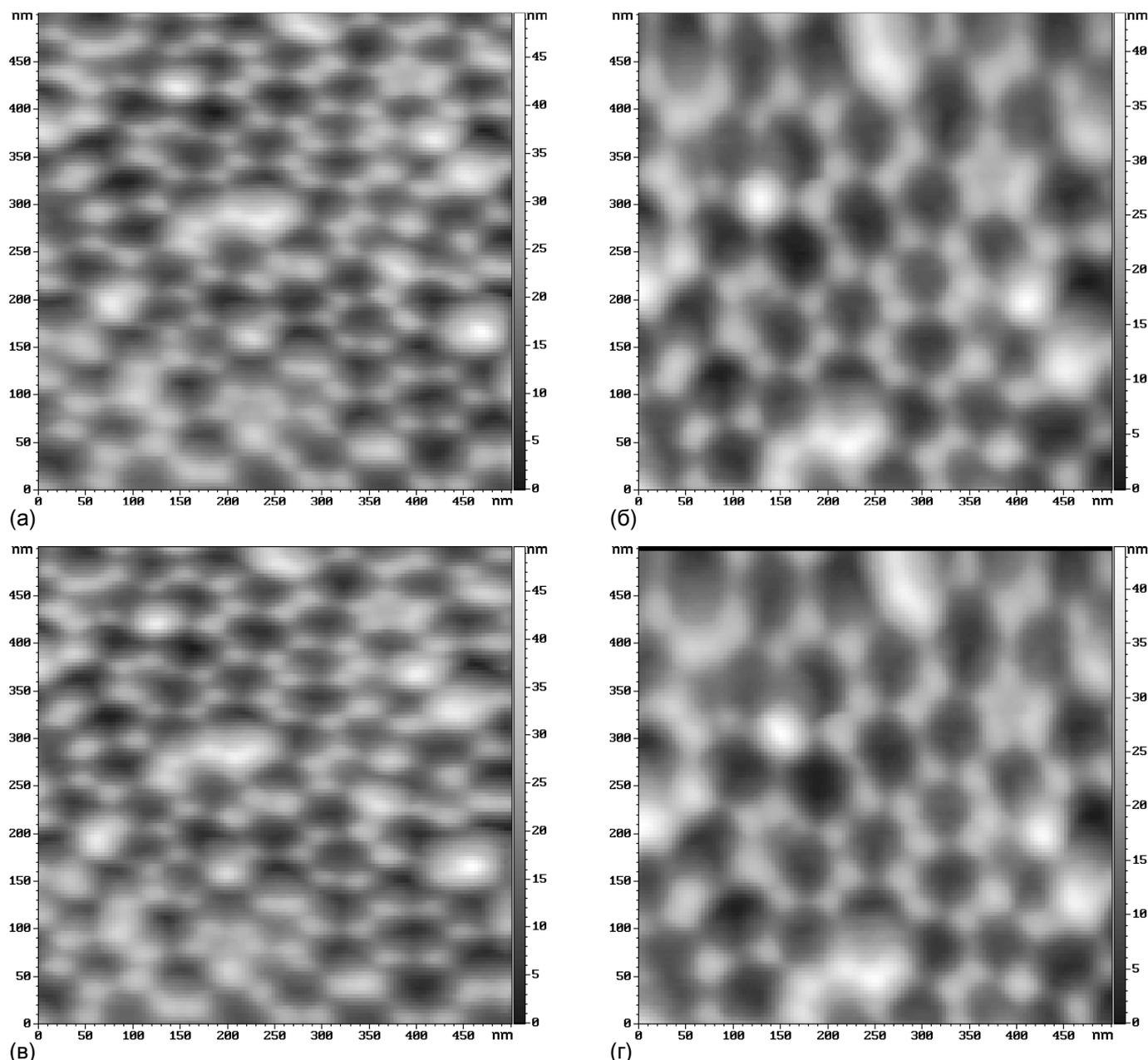


Рис. 14. Искажённые дрейфом ВСИ квазиупорядоченной пористой поверхности оксида алюминия. (а), (б) 1-ая пара ВСИ. (в), (г) 2-ая пара ВСИ. Режим измерений: АСМ, тэппинг-мода, упругость кантилевера ≈ 12 Н/м, резонансная частота 290.295 кГц. Число точек в растре $m_x=m_y=127$. Размер шага при сканировании: $\Delta_x=3.913$ нм, $\Delta_y=3.935$ нм. Минимальное изменение длины Z манипулятора $\Delta_z=0.032$ нм. Число усреднений в точке раstra 5. Скорость сканирования $v_x=v_y=1109.7$ нм/с (определена в процессе тренировки, $k=1$). Время сканирования 3 мин 50 с. Чтобы увидеть детали рельефа из изображений были вычтены средние наклоны поверхности.

заданной погрешностью. Окончательное изображение получается после отбрасывания той части исправленного изображения, которая расположена ниже позиции последней из этих особенностей.

3.1.2. Нелинейная коррекция дрейфа

На Рис. 9 показаны регрессионные поверхности 3-го порядка, проведённые через локальные смещения $D1_x(x,y)$, $D1_y(x,y)$ особенностей 1-го ВСИ. На Рис. 10 даны результаты нелинейной коррекции каждой из пар ВСИ в латеральной плоскости. На Рис. 11 показано изображение, полученное в ходе совмещения и последующего усреднения в вертикальной плоскости изображений, представленных на Рис. 10. В Таблице 3 приведены остаточные погрешности совмещения, даваемые предложенным методом нелинейной коррекции. Из полученных результатов следует, что за счёт более точного совмещения используемых особенностей (сравните Рис. 10 с Рис. 6) нелинейный подход в сравнение с линейным обеспечивает более высокую точность исправления рельефа.

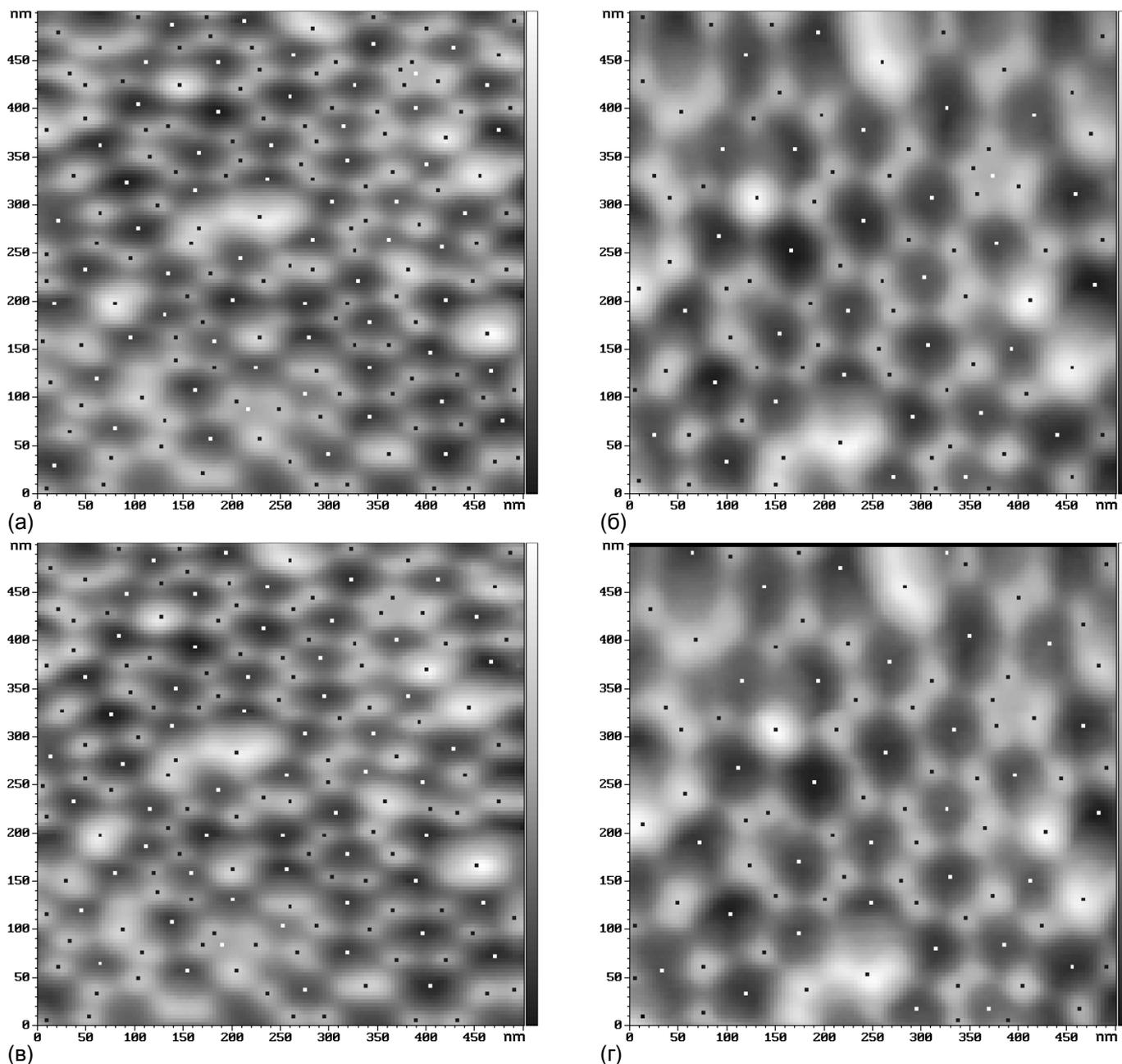


Рис. 15. Особенности поверхности, распознанные на ВСИ пористого оксида алюминия. (а), (б) 1-ая пара ВСИ. (в), (г) 2-ая пара ВСИ. В качестве особенностей поверхности выступают и холмы и ямы (поры). Перед распознаванием из изображений был удалён средний наклон поверхности и выполнено сглаживание рельефа путём усреднения в матрице 3×3 . Распознанные холмы помечены чёрными точками, а поры – белыми. Общее количество обнаруженных особенностей: (а) 179, (б) 97, (в) 173, (г) 96. Среднее расстояние между порами: (а) 64.1 нм, (б) 82.9 нм, (в) 64.1 нм, (г) 82.6 нм.

Изображения, исправленные с помощью линейного метода, после совмещения обычно оказываются размыты в верхней и в нижней части. Изображения, реконструированные из отдельных фрагментов, как показано на Рис. 12, напротив, не имеют вообще никакого размытия (сравните с Рис. 7а). Однако в полной мере идея поэлементной коррекции может быть реализована только в методе ООС.

О сегментной структуре Рис. 12 можно судить лишь по изрезанным краям, каких-либо других артефактов, связанных с сегментами, на этом рисунке не наблюдается. Следует обратить внимание на то, что максимальный перепад высот на Рис. 12 (см. вертикальную шкалу) больше максимального перепада высот на Рис. 7а, что свидетельствует о более адекватной коррекции рельефа в вертикальной плоскости.

3.1.3. Латеральная калибровка сканера

Усреднённая постоянная решётки a , вычисленная по данным, представленным на Рис. 12, равна 2.113 \AA , что соответствует относительной методической погрешности измерения 14%. Указанная погрешность связана с погрешностью предыдущей калибровки XY сканера микроскопа,

Таблица 4. Составляющие средней скорости дрейфа СЗМ-зонда относительно поверхности. Для вертикальной составляющей приведены три значения, полученные тремя различными способами.

| Образец | ВСИ | \bar{v}_x (Å/c) | \bar{v}_y (Å/c) | $ \bar{v}_{xy} $ (Å/c) | \bar{v}_z (Å/c) | | |
|---|-----|-------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------|------|
| ВОПГ | 1 | -0.063 | -0.066 | 0.091 | – | – | – |
| | 3 | 0.082 | -0.063 | 0.103 | – | – | – |
| Пористый Al ₂ O ₃ | 1 | 1.41 | 16.91 | 16.96 | 2.94 | 2.93 | 3.26 |
| | 3 | 3.07 | 16.54 | 16.82 | 3.14 | 3.13 | 3.36 |

которая была выполнена без учёта искажающего действия дрейфа. Применяя методику автоматической калибровки, описанную в работе [9], были определены корректирующие коэффициенты $\bar{K}_x=1.1896$, $\bar{K}_y=1.1429$ и угол косости $\alpha=0.4^\circ$ (учитывает неортогональность между X и Y пьезоманипуляторами).

Калибровка сканера выполнена по равносторонним треугольникам, обнаруженным на Рис. 12. Из всего множества треугольников выбирались треугольники, стороны которых кратны 5-ти постоянным решётки графита. 184 таких треугольников было найдено среди атомов углерода и 175 треугольников среди междоузлий.

В численном выражении найденные латеральные калибровочные коэффициенты оказались очень близки друг к другу: $\bar{K}_x \Delta_x=0.306 \text{ \AA}$, $\bar{K}_y \Delta_y=0.307 \text{ \AA}$, что свидетельствует о практически полной идентичности каналов развёртки используемого микроскопа (сквозная идентичность каналов обеспечивается производителем в процессе специальной настройки). Следует отметить, что одинаковость латеральных калибровочных коэффициентов говорит об отсутствии диспропорции в получаемых изображениях, а также может служить одним из подтверждений правильности выполненного исправления дрейфа.

После коррекции масштаба и косости изображения на Рис. 12 атомная поверхность графита приобретает вид, показанный на Рис. 13а. Усреднённая постоянная решётки a на полученном изображении равна 2.4638 \AA , что соответствует относительной погрешности измерения около 0.01%. Крошечное различие в 0.001 \AA между калибровочными коэффициентами вызвано как погрешностями настройки каналов развёртки, так и погрешностью метода исправления дрейфа. Отсюда можно получить другую оценку погрешности измерения для a – около 0.33%. Полученные значения погрешностей согласуются с погрешностями, приведёнными в Таблице 3.

На Рис. 13б дано стилизованное изображение поверхности графита, на котором атомы углерода изображены условно в виде шаров. Стилизованные изображения позволяют представить структуру состоящей из одинаковых элементов поверхности в обобщённом виде, схематично, а также визуально выявлять дефекты поверхности незаметные на реальном изображении. Например, вблизи верхнего края Рис. 13б хорошо видно понижение атомного рельефа, что совершенно не заметно на Рис. 13а. В данном случае имеет место краевой артефакт, типичный для применяемого метода Фурье-сглаживания (см. Рис. 4). Для устранения дефекта нужно обрезать края изображения. С помощью стилизованных изображений также легко увидеть смещение позиций междоузлий (на Рис. 13б не показаны) относительно позиций атомов, что может указывать на особенности строения кристалла и/или наличие дефектов, но наиболее часто является следствием асимметрии кончика зонда.

Следует отметить, что определение калибровочных коэффициентов и угла косости позволяет также подтвердить правильность предложенного способа исправления дрейфа. При разных по величине и направлению дрейфах, на разных размерах получаемых изображений и при разных скоростях сканирования данные величины вблизи начала координат сканера должны изменяться незначительно. Указанный критерий нашёл подтверждение на практике при проведении серии проверочных измерений.

3.1.4. Вычисление скорости дрейфа

Численное определение скоростей дрейфа в латеральной плоскости произведено по форму-

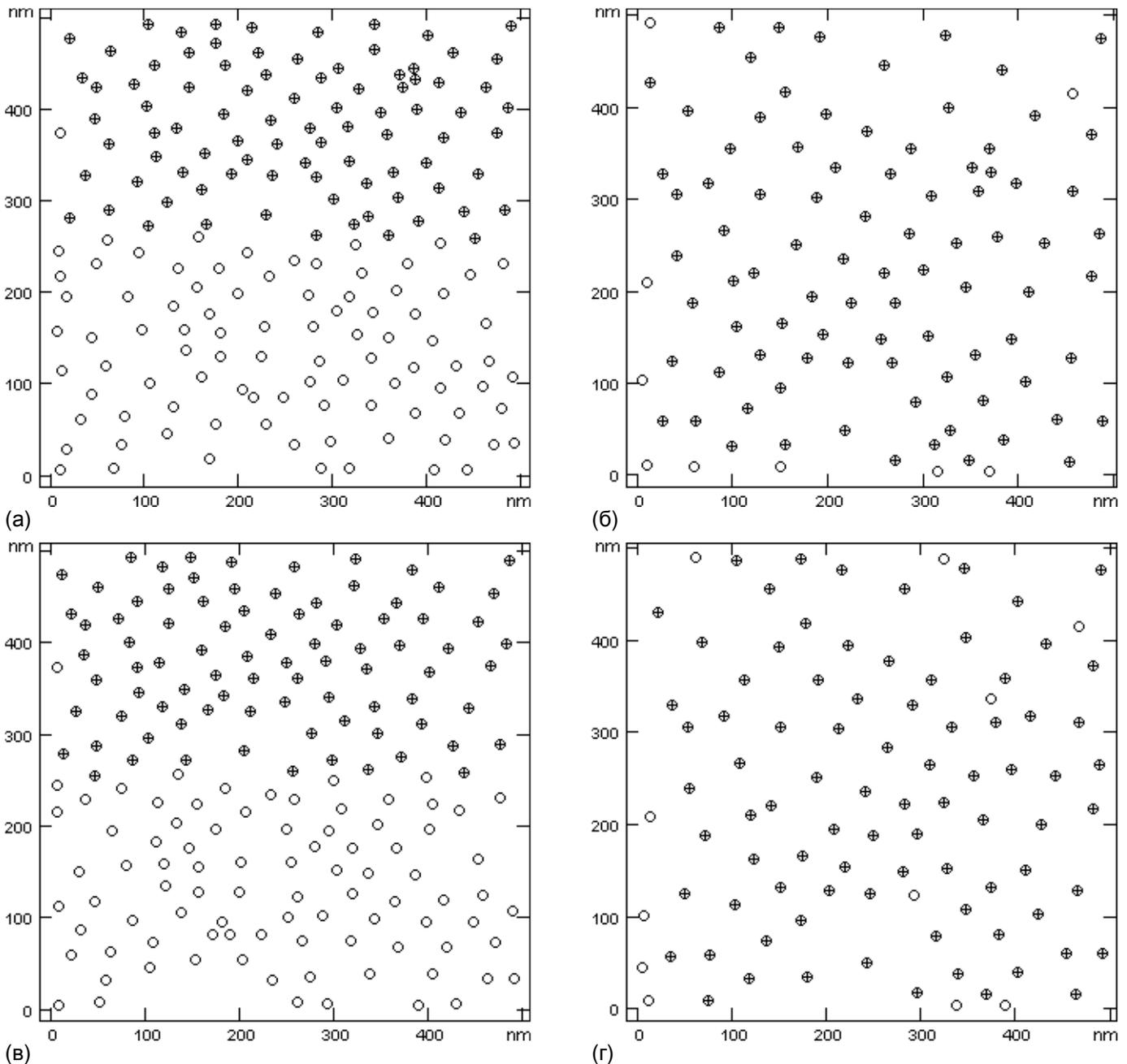


Рис. 16. Обнаружение пар особенностей в ВСИ пористого оксида алюминия. (а), (б) 1-ая пара ВСИ, содержит 88 общих особенностей. (в), (г) 2-ая пара ВСИ, содержит 85 общих особенностей. Особенности, отстоящие от краёв скана менее чем на 10 нм, в расчёт не принимались. Несмотря на очень большие искажения, пары особенностей в ВСИ были выявлены в ходе итеративного процесса поиска без ошибок. Вызванная дрейфом максимальная относительная погрешность измерений в латеральной плоскости δ_{max} : (а), (б) 24.6%; (в), (г) 24.4%.

лам (13). Чтобы учесть выявленную погрешность калибровки, полученные скорости \bar{v}_x и \bar{v}_y были умножены на коэффициенты \bar{K}_x и \bar{K}_y , соответственно. Найденные значения представлены в Таблице 4.

Использование режима постоянной высоты при сканировании атомарной поверхности графита не позволяет определить скорость дрейфа в вертикальной плоскости. Дело в том, что следящая система в данном режиме компенсирует медленные изменения туннельного тока, вызываемые вертикальной составляющей дрейфа. В результате, токовое изображение практически не искажается вертикальным дрейфом.

3.2. Исправление искажённого дрейфом скана пористой поверхности оксида алюминия

На Рис. 14 показаны две пары ВСИ квазиупорядоченной пористой поверхности оксида алюминия. Поры в оксиде алюминия получены путём анодирования алюминиевой фольги в водном растворе щавелевой кислоты [10]. Чтобы лучше рассмотреть детали морфологии, из приводимых

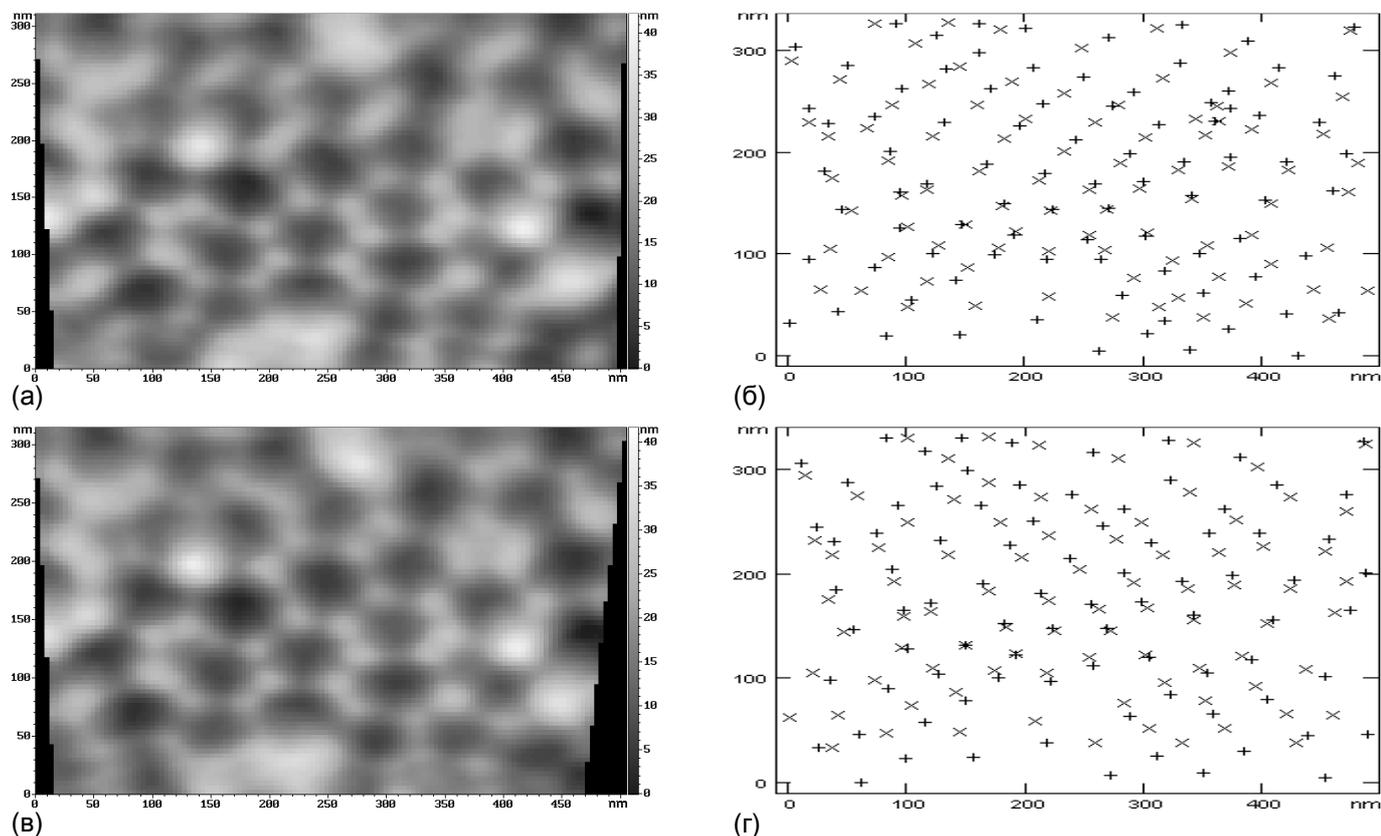


Рис. 17. Исправленные ВСИ пористого оксида алюминия: (а) 1-ая пара; (в) 2-ая пара. Исправленные положения особенностей после совмещения ВСИ: (б) 1-ая пара; (г) 2-ая пара. Среднее рассовмещение Δ : (а), (б) 16.6 нм; (в), (г) 15.8 нм. Средняя погрешность по полю изображения δ : (а), (б) 1.5%; (в), (г) 1.4%.

здесь и ниже изображений были предварительно вычтены средние наклоны поверхности. В отсутствие дефектов каждая пора имеет 6 соседних пор, образующих правильный шестиугольник. По периметру отверстия каждой поры расположены 6 небольших холмиков, также образующих правильный шестиугольник. На Рис. 15 показаны особенности поверхности пористого оксида алюминия, обнаруженные в ходе распознавания. Простейшая статистика найденных особенностей представлена в Таблице 1.

В ходе экспериментов было замечено, что пористая поверхность оксида алюминия хорошо адсорбирует атмосферную влагу, т. е. является гидрофильной. Присутствие слоя воды на поверхности делает разрешение пор практически невозможным. Попытка, увеличив силу прижатия зонда кантилевера к поверхности (использовался кантилевер фирмы НТ-МДТ), проколоть этот слой и измерить твёрдый рельеф не дала хороших результатов. Также не удалось получить чёткий сигнал и после увеличения амплитуды свободных колебаний кантилевера.

Увидеть сами поры, а также более тонкую структуру – ободок из 6 холмиков – оказалось возможным только после удаления адсорбированного слоя воды посредством прогрева образца при

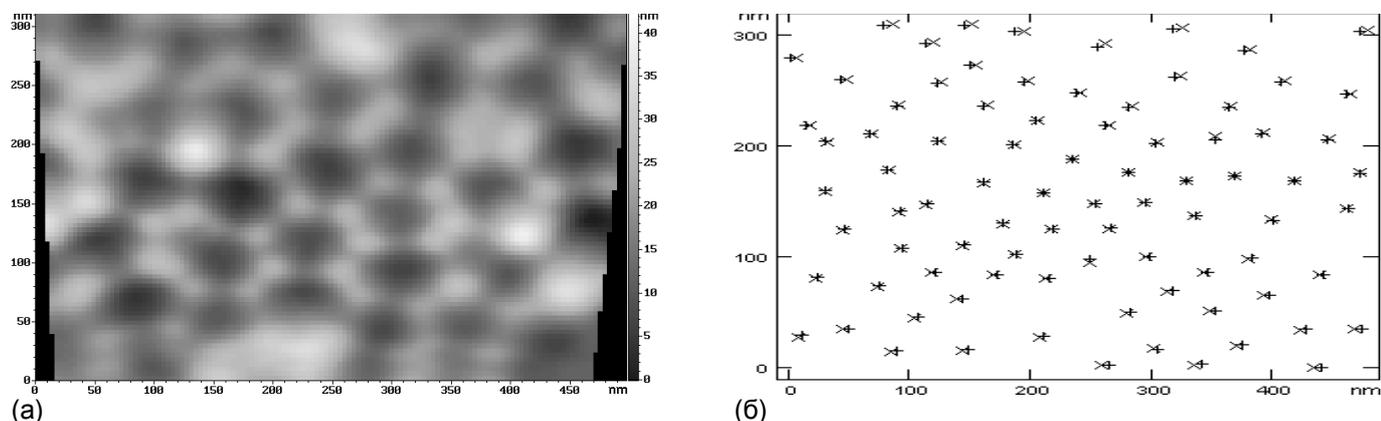


Рис. 18. Совмещённые в одно изображение исправленные пары ВСИ пористого оксида алюминия: (а) рельеф поверхности, (б) взаимные положения особенностей. Количество общих особенностей в совмещённых парах ВСИ – 84. Средняя величина рассовмещения $\Delta=3.1$ нм. Средняя погрешность по полю изображения $\delta=0.2\%$.

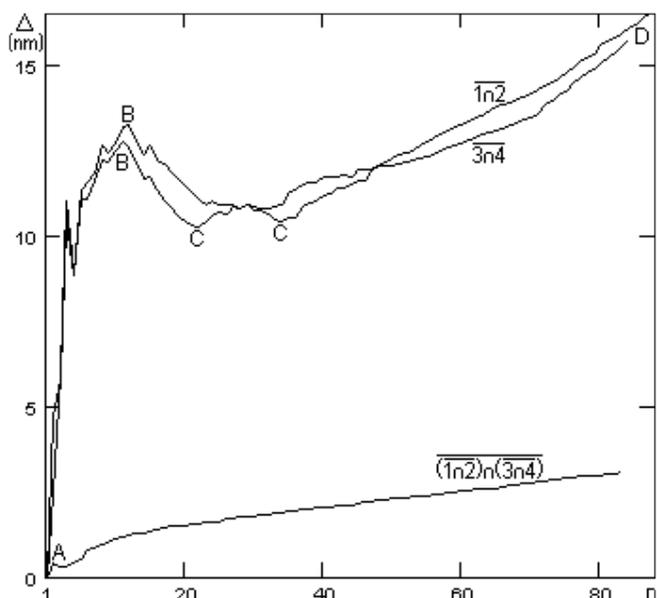


Рис. 19. Зависимость среднего взаимных расхождений исправленных позиций пар особенностей от порядкового номера пары, построенная для сканов пористого оксида алюминия.

Вследствие указанных ограничений по времени встречное сканирование осуществлялось практически сразу после подвода зонда и обнаружения подходящего участка пористой поверхности.

Таким образом, из-за невозможности длительной релаксации микроскопа помимо ползучести, возникающей в процессе сканирования, и типичного для используемого микроскопа термодрейфа во время измерения топографии оксида алюминия действовали следующие дополнительные дрейфы: ползучесть Z манипулятора после подвода, ползучести X, Y манипуляторов в результате смещения зонда к положению начала скана, а также та часть теплового дрейфа, которая образуется вследствие неравномерного охлаждения держателя и образца после нагрева их до указанной температуры. Затвердевание двухстороннего скотча, на котором был закреплён образец, вероятно, также приводило к дополнительному движению.

В сумме действие приведённых негативных факторов настолько сильно искажает изображение, что встречный скан содержит только половину (!) участка поверхности, полученного на прямом скане. Несмотря на столь значительные искажения, даже применение линейной модели, как будет показано ниже, позволяет исправить данные изображения с вполне приемлемой погрешностью.

3.2.1. Линейная коррекция дрейфа

На Рис. 16 знаком “+” отмечены те особенности поверхности оксида алюминия, которые были

температуре 70-80°C в течение нескольких минут. Время “жизни” поверхности после выключения нагревателя составляет при комнатной температуре и относительной влажности 50-70% около 10-15 минут, спустя которое, поверхность снова “зарастает” и становится непригодной для сканирования с высоким разрешением.

Было обнаружено также, что процесс сканирования стимулирует процессы перераспределения/конденсации влаги на пористой поверхности, поскольку повторное сканирование уже однажды просканированных участков давало худший контраст по сравнению с теми участками, расположенными по соседству, где впоследствии сканирование производилось впервые. Похожий эффект, правда, на гидрофобной поверхности ВОПГ, наблюдался в работе [11].

Так как используемый микроскоп не имел нагревателя, встроенного в держатель образца, то нагрев производился вне микроскопа. Горячий образец устанавливался в микроскоп, после чего в течение 5-10 минут производилось сканирование.

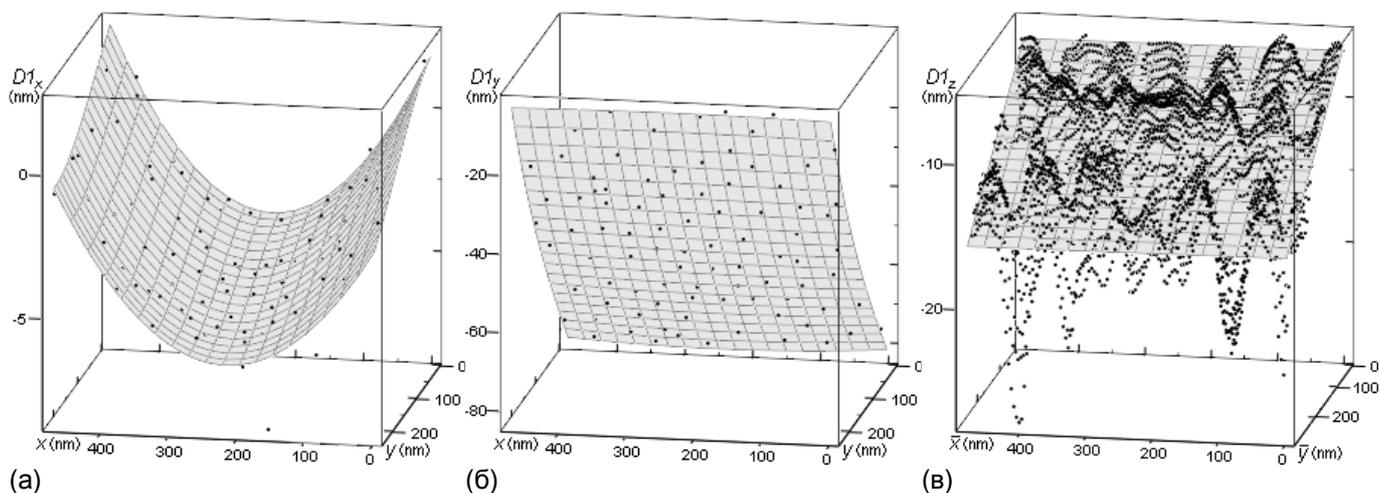


Рис. 20. Регрессионные поверхности, проведённые через локальные (а) D_x смещения особенностей, (б) D_y смещения особенностей, (в) D_z смещения высот рельефа 1-го ВСИ пористого оксида алюминия. Порядок регрессионной поверхности: (а), (б) 3; (в) 1.

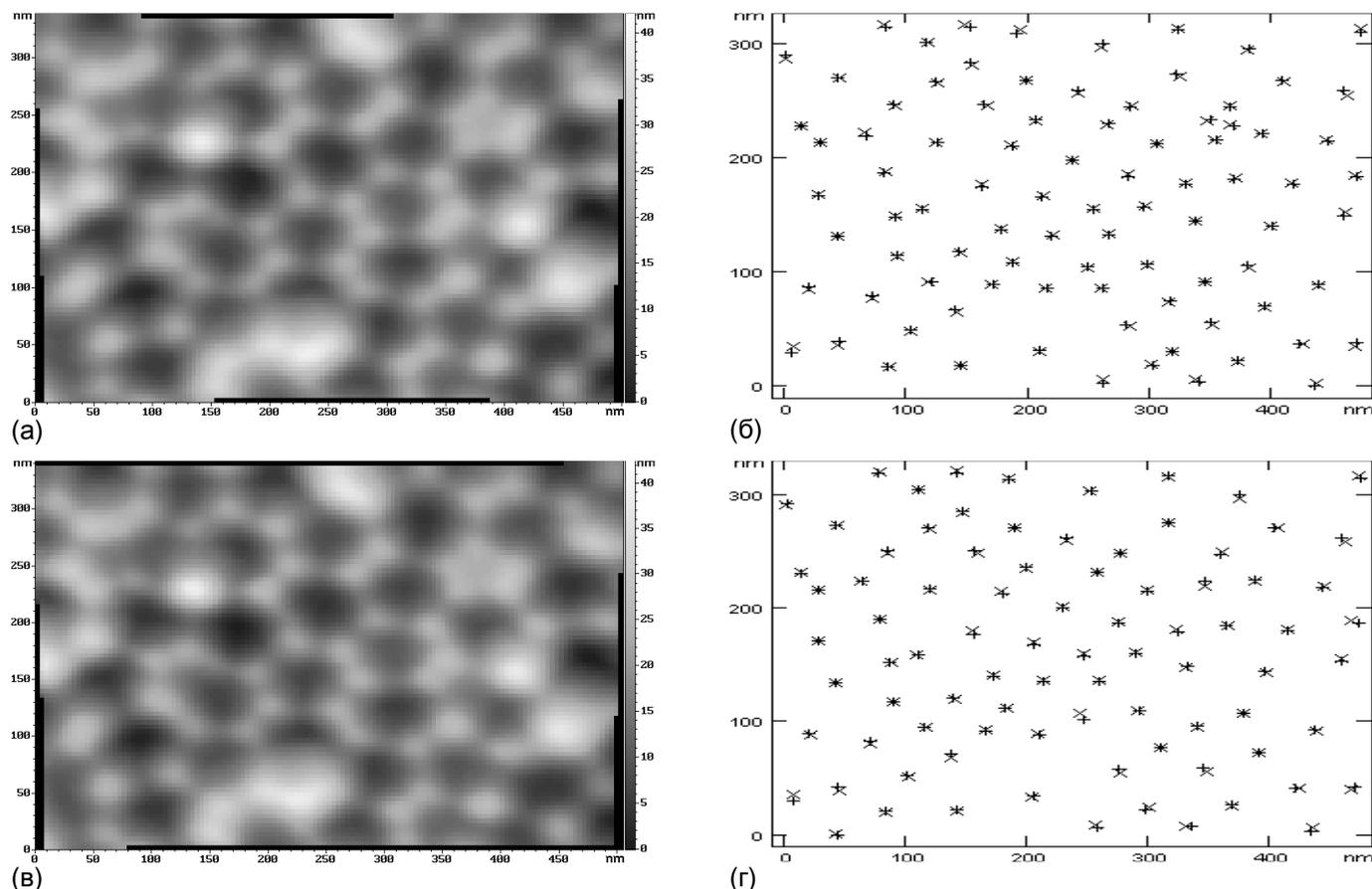


Рис. 21. ВСИ пористого оксида алюминия после проведения нелинейной коррекции: (а) 1-ая пара; (в) 2-ая пара. Исправленные положения особенностей после совмещения ВСИ: (б) 1-ая пара; (г) 2-ая пара. Среднее рассовмещение Δ : (а), (б) 1.9 нм; (в), (г) 1.9 нм. Средняя погрешность по полю изображения δ : (а), (б) 0.16%; (в), (г) 0.15%. В отличие от линейной коррекции размытость в верхней и в нижней частях изображений отсутствует (сравните с Рис. 17).

обнаружены на обоих ВСИ в ходе выполнения итеративного процесса поиска пар особенностей. Вызванная дрейфом максимальная относительная погрешность измерений в латеральной плоскости δ_{max} составляет: 24.6% в 1-ой паре ВСИ и 24.4% во 2-ой паре ВСИ.

Подставляя найденные координаты особенностей в выражения (5), определены КЛП K_x , K_y (см. Таблицу 2). Следует отметить, что приведённые в разделе 2.2 отношения между неравенствами для коэффициентов K_x пар ВСИ нарушены, по-видимому, из-за существенного изменения x составляющей скорости дрейфа (обратите внимание на сильное искривление приведённой ниже регрессионной поверхности). КЛП K_z , найденные по формуле (12) в ходе вертикальной коррекции, помещены в Таблицу 2.

На Рис. 17 для 1-ой и 2-ой пар ВСИ показаны: исправленный рельеф и остаточное рассовмещение особенностей. Латеральные и вертикальные погрешности совмещения приведены в Таблице 3, там же указаны относительные погрешности коррекции. На Рис. 18а дан результат линейной коррекции дрейфа по двум парам ВСИ, на Рис. 18б показано соответствующее остаточное рассовмещение.

Чтобы избежать размытия изображения и, как следствие, потери полезной топографической информации, можно вообще отказаться от совмещения исправленных ВСИ (Рис. 2, поз. 8, 9). В этом случае решение о выборе одного из четырёх изображений, наилучшим образом характеризующего исследуемую поверхность, принимает микроскопист.

На Рис. 19 представлены найденные в процессе итеративного поиска пар особенностей зависимости среднего взаимных отклонений исправленных позиций пар особенностей от порядкового номера пары. Составляющие скорости дрейфа, действовавшие при встречном сканировании оксида алюминия, приведены в Таблице 4.

3.2.2. Нелинейная коррекция дрейфа

На Рис. 20 показаны регрессионные поверхности, проведённые через локальные латеральные смещения особенностей и через локальные смещения высот рельефа 1-го ВСИ. На Рис. 21 даны результаты нелинейной коррекции 1-ой и 2-ой пар ВСИ, а также соответствующие остаточ-

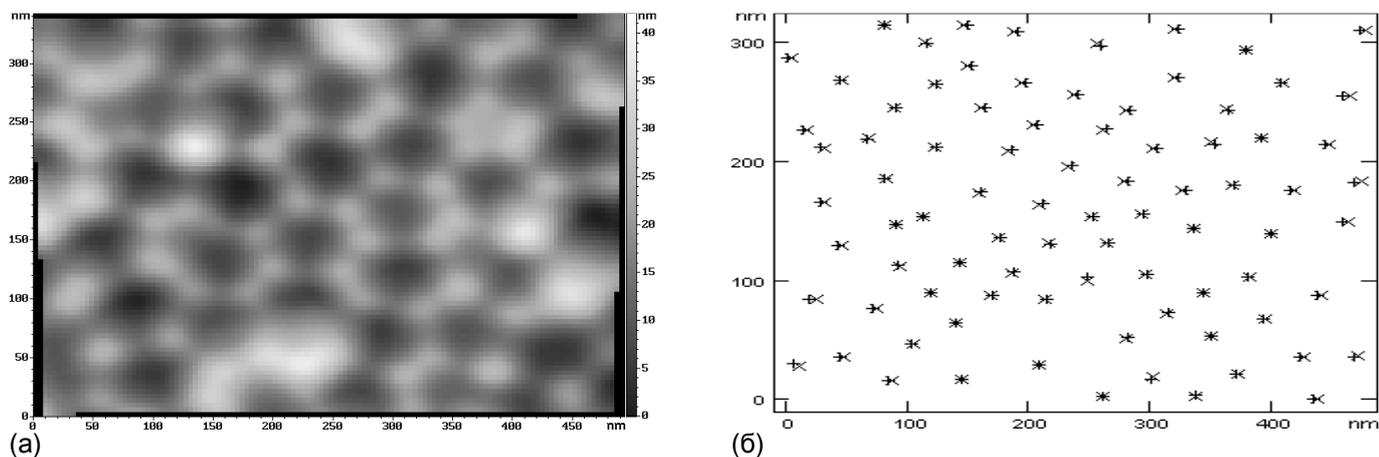


Рис. 22. Совмещённые в одно изображение исправленные нелинейным способом пары ВСИ пористого оксида алюминия: (а) рельеф поверхности, (б) взаимные положения особенностей. Средняя величина рассовмещения $\Delta=2.2$ нм. Средняя погрешность по полю изображения $\delta=0.14\%$.

ные рассовмещения особенностей. На Рис. 22 представлена нелинейная коррекция дрейфа по двум парам ВСИ. В отличие от линейной коррекции, нелинейная коррекция даёт гораздо более чёткое изображение пористой поверхности оксида алюминия (сравните Рис. 21 с Рис. 17, сравните также погрешности совмещения, указанные в Таблице 3).

На Рис. 23а изображена исправленная поверхность пористого оксида алюминия, реконструированная в ходе нелинейной коррекции из сегментов особенностей. Здесь также хорошо видно, что построенное изображение является чётким по всему полю скана, а не только в центре, как было получено ранее на Рис. 18а. По данным Рис. 23а определены средние расстояния между холмами 44.9 нм и между порами 69.9 нм. На Рис. 23б показана модель поверхности пористого оксида алюминия.

4. Обсуждение

Несмотря на значительную термосоставляющую дрейфа, вызванную нагревом образца, и наличие ползучести, вызванной смещением зонда в точку начала скана, основной вклад в искажение изображений поверхности оксида алюминия вносит ползучесть пьезоманипуляторов, возникающая во время развертки. На это указывают типичные для такой ползучести искажения вдоль направления “медленного” сканирования: прямое изображение сжато и поэтому содержит больше особенностей, чем встречное, которое, наоборот, растянуто (см. Рис. 14-16, а также Таблицы 1, 2, 4).

Наблюдаемая картина полностью противоположна той, которая была получена на графите (см. Рис. 3-5, а также Таблицы 1, 2, 4), следовательно, в атомном масштабе, как изначально предполагалось, термодрейф является основным искажающим фактором. Качественно описанные искажения графита и оксида алюминия повторялись на разных образцах, при разных скоростях сканирования и размерах сканов (скорости и размеры отличались в 2 раза в меньшую и большую стороны от приведённых выше).

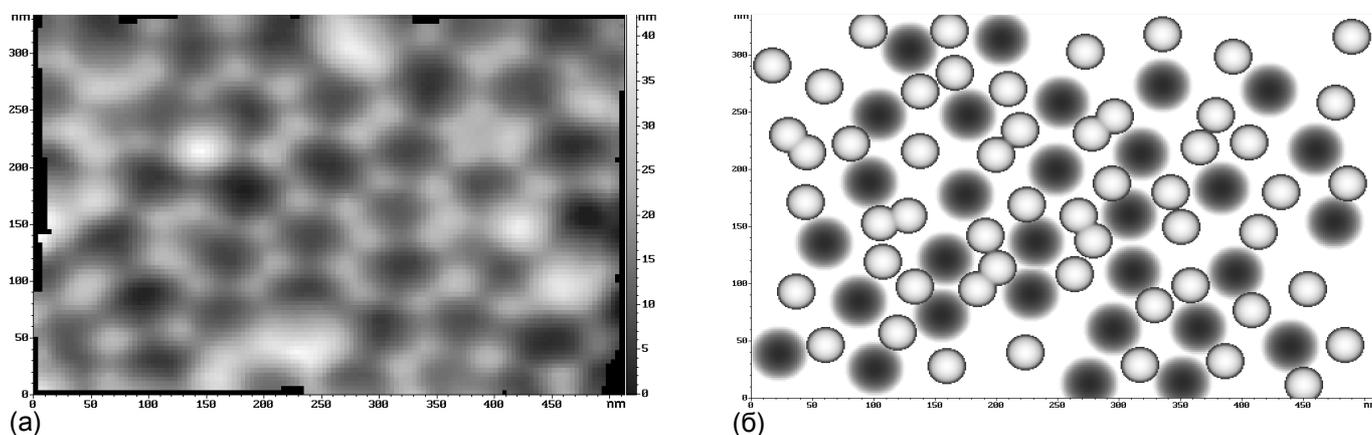


Рис. 23. Рельеф поверхности пористого оксида алюминия, полученный после нелинейной коррекции дрейфа. (а) Реальное изображение, собранное из отдельных частично перекрывающихся сегментов. Размытость вследствие рассовмещения латеральных позиций особенностей отсутствует (сравните с Рис. 18а). (б) Стилизованное изображение. Среднее расстояние между порами 69.9 нм.

Тот факт, что, несмотря на значительное остаточное рассовмещение в парах (см. Рис. 17б, г), все четыре изображения пористой поверхности оксида алюминия удалось довольно точно совместить в одном изображении (см. Рис. 18б и Таблицу 3), указывает на то, что развитие искажения в 1-ой и 2-ой парах ВСИ происходит одинаково (см. Таблицы 1-4). Полученный результат служит экспериментальным доказательством обоснованности метода коррекции по двум парам ВСИ.

Из-за внутренней избыточности ООС, его производительность гораздо ниже производительности обычного сканирования, тогда как точность измерений, напротив, существенно выше [6]. Для ряда практических задач, очень высокая точность измерений не требуется, но важна обеспечиваемая ООС подходом функциональность при удовлетворительной производительности сканирования. В таком случае следует отказаться от операции скиппинга и собирать поверхность не из сегментов, а из апертур.

Выполняя встречное сканирование апертуры с последующим исправлением дрейфа предложенными методами, можно определить истинный рельеф в апертуре, а, следовательно, и истинное расстояние между текущей и следующей особенностями цепочки. Располагая исправленными апертурами и относительными расстояниями между ними, нетрудно выполнить реконструкцию всей поверхности.

5. Выводы

Предложенный метод обеспечивает исправление дрейфа, основываясь исключительно на информации, заключённой в ВСИ, информация о скорости дрейфа не требуется.

Применение встречного сканирования позволяет:

- (1) легко выявлять пары особенностей благодаря наличию ТС, в окрестности которой рельеф практически совпадает;
- (2) увеличить точность коррекции дрейфа за счёт получения большей разницы в координатах положения особенностей, составляющих пару;
- (3) обеспечивать заранее заданную погрешность измерения в пределах определённой области изображения в соответствии с фактическим изменением скорости дрейфа, имевшим место во время встречного сканирования;
- (4) уменьшить ползучесть, производимую пьезосканером в процессе ООС, путём возбуждения встречной ползучести при сканировании сегментов/апертур рельефа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 05-01-00407, 05-03-32394, 07-07-00062) и Правительства Москвы (грант 1.1.213). Автор выражает благодарность О. Э. Ляпину, С. Ю. Васильеву и О. В. Объедкову за критическое прочтение рукописи, С. А. Саунину за помощь при встраивании встречного сканирования в программу управления СЗМ, С. А. Гаврилову за предоставленный образец пористого оксида алюминия.

Литература

- [1] J. E. Griffith, D. A. Grigg, Dimensional metrology with scanning probe microscopes, J. Appl. Phys. **74**, R83, 1993.
- [2] J. E. Griffith, G. L. Miller, C. A. Green, D. A. Grigg, P. E. Russell, A scanning tunneling microscope with a capacitance-based position monitor, J. Vac. Sci. Technol. B **8**, 2023, 1990; R. C. Barrett, C. F. Quate, Optical scan-correction system applied to atomic force microscopy, Rev. Sci. Instrum. **62**, 1393, 1991; H. Zhang, F. Huang, T. Higuchi, Dual unit scanning tunneling microscope-atomic force microscope for length measurement based on reference scales, J. Vac. Sci. Technol. B **15**, 780, 1997.
- [3] V. Y. Yurov, A. N. Klimov, Scanning tunneling microscope calibration and reconstruction of real image: Drift and slope elimination, Rev. Sci. Instrum. **65**, 1551, 1994.
- [4] V. B. Elings, J. A. Gurley, M. R. Rodgers, Drift compensation for scanning probe microscopes using an enhanced probe positioning system, U. S. Patent No. 5077473, 1991; R. S. Robinson, Method and apparatus for correcting distortions in scanning tunneling microscope images, U. S. Patent No. 5107113, 1992; J. F. Jørgensen, L. L. Madsen, J. Garnæs, K. Carneiro, K. Schaumburg, Calibration, drift elimination, and molecular structure analysis, J. Vac. Sci. Technol. B **12**, 1698, 1994; Y. Sun, J. H. L. Pang, AFM image reconstruction for deformation measurements by digital image correlation, Nanotechnology **17**, 933, 2006.
- [5] Р. В. Лапшин, Способ коррекции искажённых дрейфом изображений поверхности, полученных на сканирующем зондовом микроскопе, Заявка на патент РФ No. 2006127131, 2006 (www.nanoworld.org/homepages/lapshin/patents.htm).
- [6] R. V. Lapshin, Feature-oriented scanning methodology for probe microscopy and nanotechnology, Nanotechnology **15**, 1135, 2004 (www.nanoworld.org/homepages/lapshin/publications.htm).

- [7] E. P. Stoll, Correction of geometrical distortions in scanning tunneling and atomic force microscopes caused by piezo hysteresis and nonlinear feedback, *Rev. Sci. Instrum.* **65**, 2864, 1994.
- [8] R. V. Lapshin, Analytical model for the approximation of hysteresis loop and its application to the scanning tunneling microscope, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 4718, 1995 (www.nanoworld.org/homepages/lapshin/publications.htm).
- [9] R. V. Lapshin, Automatic lateral calibration of tunneling microscope scanners, *Rev. Sci. Instrum.* **69**, 3268, 1998 (www.nanoworld.org/homepages/lapshin/publications.htm).
- [10] A. P. Li, F. Müller, A. Birner, K. Nielsch, U. Gösele, Hexagonal pore arrays with a 50–420 nm interpore distance formed by self-organization in anodic alumina, *J. Appl. Phys.* **84**, 6023, 1998.
- [11] M. Luna, J. Colchero, A. Gil, J. Gómez-Herrero, A. M. Baró, Application of non-contact scanning force microscopy to the study of water adsorption on graphite, gold and mica, *Appl. Surf. Sci.* **157**, 393, 2000.