

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

В.А. Хоменко, С.Л. Леонов, А.О. Черданцев, П.О. Черданцев, А.В. Дыбайло

*Изложены принципы построения имитационных математических моделей процессов лезвийной обработки, ориентированных на прогнозирование геометрических параметров качества обработанных поверхностей посредством анализа их топографии.*

*Ключевые слова: имитационное моделирование, лезвийная обработка, САМ-системы, САЕ-системы, станки с ЧПУ, качество поверхности, процесс резания.*

Растущие требования к качеству машиностроительной продукции задают направления развития машиностроительного производства, которое сегодня основывается на применении станков с ЧПУ и специализированных САПР [1]. Однако слабым местом современных САПР является уровень проработки аспектов, связанных с инженерией поверхности. Одним из основных требований к качеству машиностроительной продукции

являются требования к геометрическим параметрам качества поверхности деталей.

Моделирование процесса механической обработки можно провести посредством САМ- и САЕ-систем (рисунок 1). Однако математические модели, на которых базируются такие системы, не рассчитаны для оценки шероховатости и точности формы поверхности получаемой в ходе обработки.

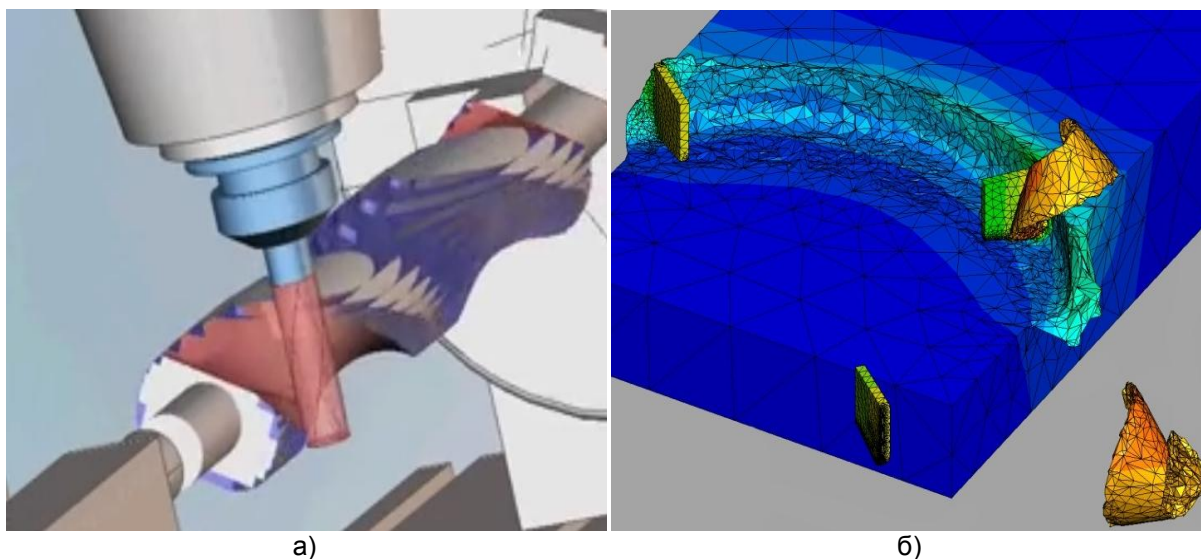


Рисунок 1 – Моделирование процесса обработки: а) САМ-система, б) САЕ-система

Достоинством САМ-систем является нативная возможность имитировать обработку с учетом траектории и возможностью смены режима резания, воплощающаяся в управляющей программе. Вместе с тем САМ-системы представляют инструмент в виде упрощенной модели без учета положения режущих кромок, что не дает возможности прогнозировать процесс формирования микрорельефа. САМ-системы не моделируют поведение обрабатываемого материала, не учитывают

силовых факторов, вибраций, упругих и пластических деформаций, имитация сводится исключительно к кинематическому вычитанию из заготовки модели перемещающегося инструмента вдоль траектории обработки.

САЕ-системы, наоборот, изначально нацелены учесть как можно больше факторов, что значительно усложняет расчеты. В моделях, как правило, используется метод конечных элементов. Сложность грамотной постановки задачи не является единственным препятстви-

ем для моделирования лезвийной обработки. Даже при применении адаптивной сетки проработка детализации до уровня пригодного для

оценки микронеровностей приводит к неприемлемому росту времени расчетов и требований к вычислительному оборудованию.

Эксплуатационные свойства деталей	Геометрические параметры качества поверхности									
	Шероховатость					Волнистость			Откл. формы	
	$R_a$	$R_z$	$R_{max}$	$S_m$	$S$	$t_p$	$W_z$	$W_{max}$	$S_w$	$\Delta_{max}$
<i>Подвижные соединения</i>										
Сухое трение	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Граничное трение	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Жидкостное трение	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
<i>Неподвижные соединения</i>										
Контактная жесткость	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Прочность сопряжений	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Герметичность	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Виброустойчивость	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
<i>Свободные поверхности</i>										
Усталостная прочность	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Коррозионная стойкость	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Прочность сцепления с покрытиями	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Оказывает значительное влияние
  Влияет
  Практически не влияет

Рисунок 2 – Влияние геометрических параметров качества поверхности на эксплуатационные свойства деталей

Эксплуатационные свойства деталей в значительной степени зависят от геометрических параметров качества обрабатываемой поверхности (рисунок 2), таких как шероховатость, отклонения формы, волнистость. Многочисленные исследования различных авторов показывают, что высота, форма, относительное расположение микронеровностей и точность формы поверхностей в целом оказывают значительное влияние на износ сопрягаемых деталей, коррозионную и эрозионную стойкость, сопротивление усталости, прочность посадок с натягом, плотность подвижных и неподвижных соединений, отказоустойчивость машин в целом, и прочих эксплуатационных характеристиках.

Так как модели и методы расчетов, используемые в САМ- и САЕ-системах, не подходят для прогнозирования геометрических параметров качества поверхностей, актуальной задачей является разработка универсальной модели для лезвийной обработки, которая, учитывая аспекты присущие лезвийной обработке на станках с ЧПУ, будет позволять прогнозировать полноценное описание формы обработанной поверхности в виде

её топографии. Топография поверхности может быть использована для расчета любых геометрических параметров качества.

В частности, расчет шероховатости и точности формы можно осуществить, если известна точная форма поверхности, представленная в виде топографии. Нами разработана имитационная математическая модель, которая дает такую возможность, эта модель представлена в виде черного ящика (рисунок 3).

Исходными данными для этой модели являются:

- Поверхность, преобразуемая из поверхности заготовки в поверхность детали при моделировании процесса обработки во времени;
- Инструмент, геометрические параметры которого реализованы в виде формы режущих кромок, а конструктивные параметры в виде ориентации и положения их в системе координат инструмента;
- Траектория, описывающая пространственно-временные положения инструмента относительно системы координат обрабатываемой поверхности.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

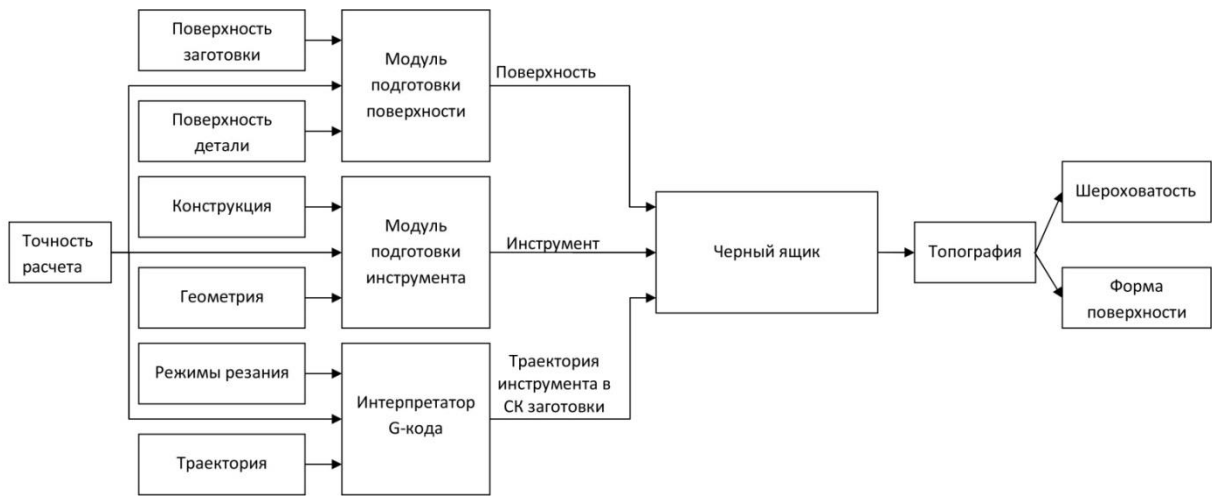


Рисунок 3 – Входные и выходные данные модели

В зависимости от требований к точности расчетов и наличия исходных данных, могут быть проработаны и аспекты, связанные с

вибрациями, силами резания, упругими и пластическими деформациями, а также износом зубьев (рисунок 4).

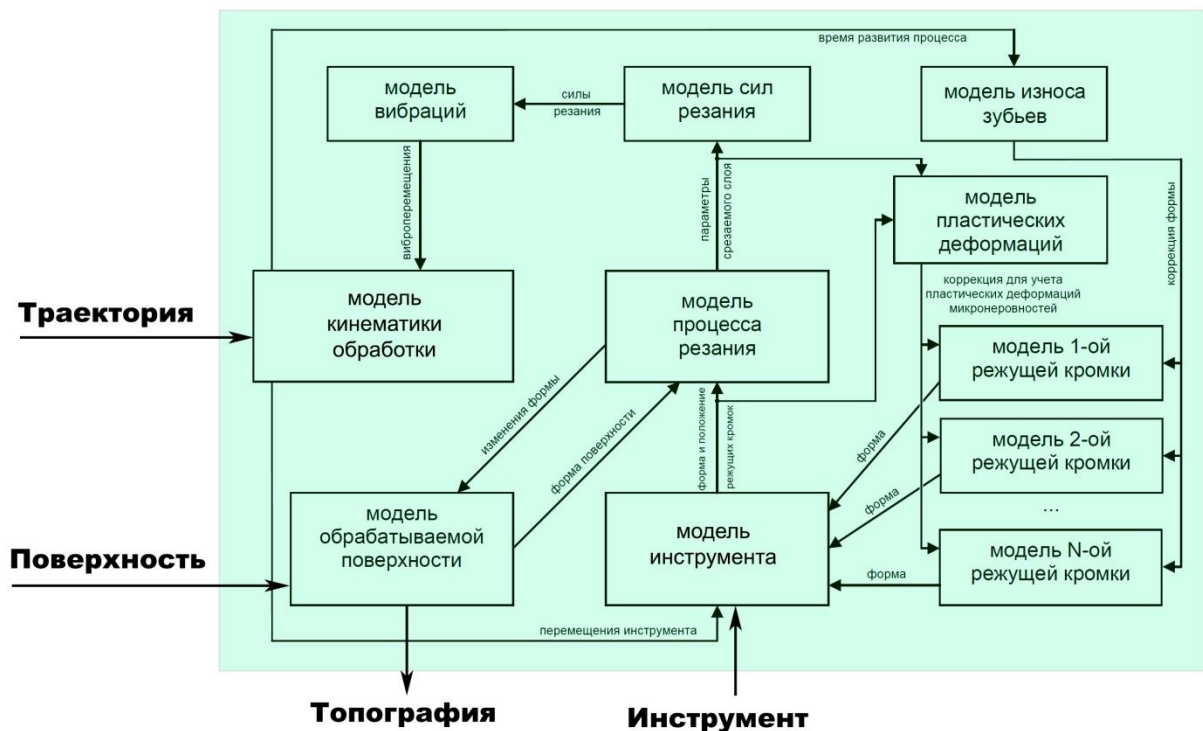


Рисунок 4 – Структура имитационной модели

При подготовке моделей поверхности, инструмента и траектории, важно учитывать, что, в конечном счете, результаты расчетов должны иметь заданную точность, соответственно, на начальном этапе необходимо задаться определенной точностью расчета, которая будет определять подробность представления поверхности инструмента и траектории.

Требуемую точность в расчетах необходимо обеспечить при формировании модели поверхности и траектории.

При формировании модели инструмента основная идея заключается в обеспечении максимального расстояния между соседними точками на режущих кромках, не превышающего заданную точность расчета. Для обра-

батываемой поверхности максимальное расстояние между соседними расчетными точками не должно превышать точность расчета.

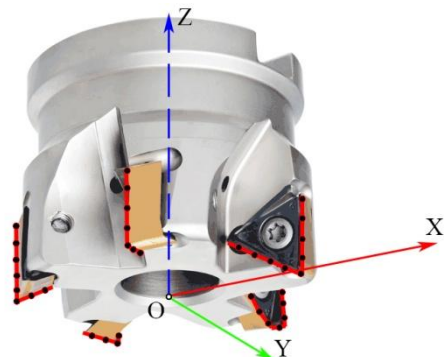


Рисунок 5 – Модели инструмента

При описании траектории необходимо рассчитывать положение базовой точки (рисунок 5, точка O). Таким образом, чтобы перемещение наиболее быстро движущейся точки инструмента, за время соответствующее одному шагу расчета, не должно превышать заданной точности расчета (рисунок 6).

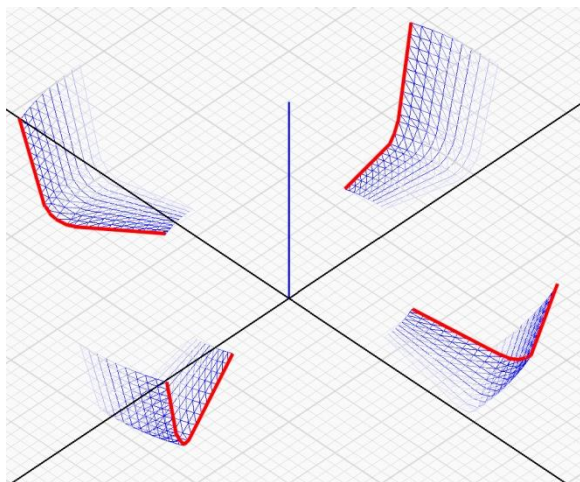


Рисунок 6 – Формирование поверхности резания при моделировании перемещения режущих кромок

Важно отметить, что на разных участках траектории, соответствующих разным кадрам управляющей программы, может меняться скорость вращения инструмента и время равное одному шагу расчета.

Силы резания возможно учесть, основываясь на подходе, предложенном В.М. Свиным [2]. Одним из недостатков подхода является способ расчета параметров срезаемого слоя из-за неопределенности их выбора. Предлагаемый нами подход даёт возможность рассчитать их с необходимой точно-

стью, для любых форм и ориентаций режущих пластин. Известно [3], что при фрезеровании площадь срезаемого слоя зубом фрезы меняется вместе с изменением его углового положения. Так же площадь срезаемого слоя определяется формой исходной поверхности и глубиной резания. При фрезеровании прерывистых поверхностей влияние изменений площади срезаемого слоя на величины сил резания особо существенно.

Модель сил резания представлена в виде следующих эмпирических зависимостей:

$$\begin{cases} F_t = 5166 \cdot a^{0,77} \cdot b \cdot v^{-0,16}; \\ F_r = 12088 \cdot a^{0,662} \cdot b^{0,998} \cdot v^{-0,395}; \\ F_o = 1635 \cdot a^{0,6} \cdot b^{0,9} \cdot v^{-0,3}, \end{cases}$$

где  $F_t, F_r, F_o$  – тангенциальная, радиальная и осевая составляющие силы резания, (Н);  $v$  – скорость резания, (м/мин);  $a, b$  – толщина и ширина срезаемого слоя, (мм). Степенные и линейные коэффициенты учитывают свойства обрабатываемого материала и могут быть получены экспериментальным путем практически для любого материала на основе анализа установившегося процесса резания [4].

Вибрации в технологической системе могут иметь совершенно различный характер. Основной причиной возникновения вибраций является воздействие силы резания, закон изменения которой носит достаточно сложный характер. Вследствие этого практически невозможно найти аналитические зависимости, позволяющие провести расчет вибраций для произвольно заданных инструмента, заготовки и режима резания.

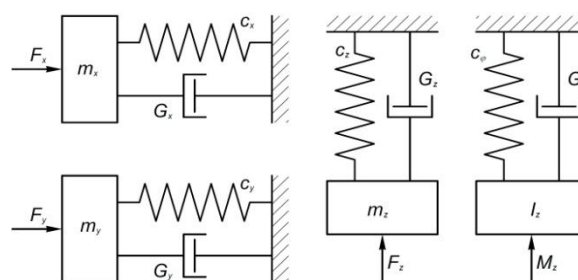


Рисунок 7 – Модель вибраций

На рисунке 7 представлена модель вибраций. Предполагается, что станок, приспособление и деталь, достаточно жесткие, чтобы пренебречь их колебаниями, а фреза совершает линейные колебания относительно всех трех осей и крутильные колебания вокруг оси z. Такое представление технологиче-



## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

ской системы может быть выражено с помощью системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_x \ddot{x} + G_x \dot{x} + c_x x = F_x \\ m_y \ddot{y} + G_y \dot{y} + c_y y = F_y \\ m_z \ddot{z} + G_z \dot{z} + c_z z = F_z \\ I_z \ddot{\varphi} + G_\varphi \dot{\varphi} + c_\varphi \varphi = M_z \end{cases}$$

где  $m_x, m_y, m_z$  – приведенные массы;  $I_z$  – приведенный момент инерции;  $G_x, G_y, G_z, G_\varphi$  – приведенные коэффициенты демпфирования;  $c_x, c_y, c_z, c_\varphi$  – приведенные жесткости;  $F_x, F_y, F_z$  – силы резания;  $M_z$  – момент сил резания относительно оси  $z$ ;  $x, y, z, \varphi$  – виброперемещения.

В предлагаемой нами модели решение системы дифференциальных уравнений осуществляется численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка, так как значения сил резания и крутящего момента в модели представляются дискретно. Вибрации оказывают значительное влияние на формирование волнистости, которая, в конечном счете, отображается в топографии поверхности.

Предложенный нами подход к проектированию имитационных математических моделей лезвийной обработки позволяет оценивать форму микронеровностей поверхностей деталей получаемых на станках с ЧПУ. При этом ключевой особенностью является возможность учета произвольных траекторий обработки и произвольных конструкций инструмента (рисунок 8).

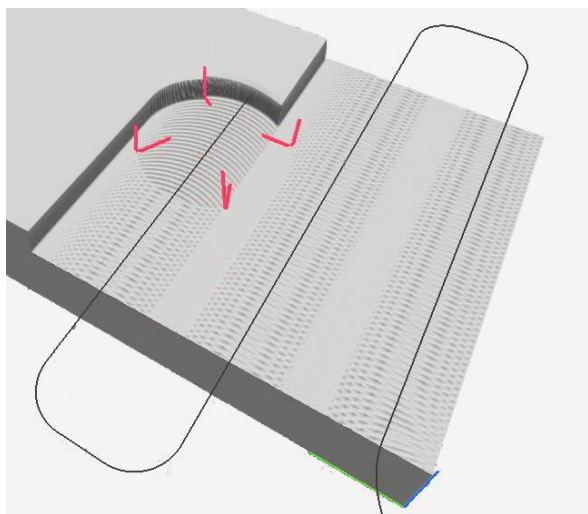


Рисунок 8 – Результаты моделирования шероховатости поверхности

На рисунке 9 представлен результат моделирования процесса ротационного фрезерования для оценки отклонений формы присутствующих данному виду обработки.

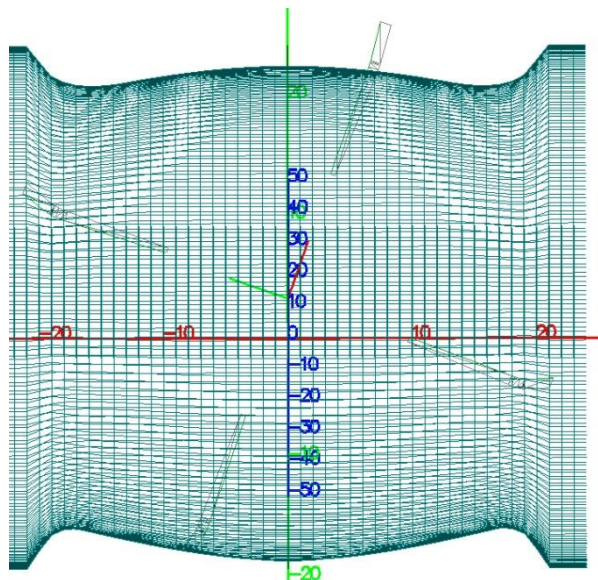


Рисунок 9 – Результаты моделирования отклонений формы

Используя предложенный метод построения моделей лезвийной обработки, становится возможной реализация алгоритмов проектирования операций и инструмента, нацеленных на достижение предъявляемых требований к геометрическим параметрам качества обрабатываемых поверхностей.

С использованием нашей модели возможна разработка специализированной САПР, взаимодействующей с САМ- и САЕ- системами, нацеленной на прогнозирование любых геометрических параметров качества обрабатываемых поверхностей на основе расчета топографии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ловыгин, А. А. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система / А. А. Ловыгин, А. В. Васильев, С. Ю. Кривцов. – М. : Изд-во «Эльф ИПР», 2006 – 286 с.
2. Свинин, В. М. Имитационное моделирование колебаний технологической системы при торцовом фрезеровании с модулированной скоростью резания / В. М. Свинин // Высокие технологии в машиностроении, материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Самара, 2007. – С. 187–189.
3. Виноградов, Д. В. Высокопроизводительная обработка металлов резанием / Д. В. Виноградов. – М. : Изд-во «Полиграфия», 2003. – 301 с.
4. Кувшинский, В. В. Фрезерование / В. В. Кувшинский. – М. : Машиностроение, 1977. – 240 с.

**Хоменко Валерий Андреевич**, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», e-mail: [tap\\_otm@mail.ru](mailto:tap_otm@mail.ru).

**Леонов Сергей Леонидович**, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», e-mail: [sergey\\_and\\_nady@mail.ru](mailto:sergey_and_nady@mail.ru).

**Черданцев Алексей Олегович**, инженер кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», e-mail: [hipertigr@mail.ru](mailto:hipertigr@mail.ru), тел.: 8-913-211-3957.

**Черданцев Павел Олегович**, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Теоретическая механика и механика машин» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», e-mail: [p004092@yandex.ru](mailto:p004092@yandex.ru).

**Дыбайло Антон Вадимович**, магистрант ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», e-mail: [antondiablo91@icloud.com](mailto:antondiablo91@icloud.com).