АЛГОРИТМ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ GERT-СЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА БПЛА ПРИ ВНЕСЕНИИ ПЕСТИЦИДОВ И УДОБРЕНИЙ

Д.И. Ковалев

Национальный исследовательский университет "Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства" (НИУ "ТИИИМСХ")

KEYWORDS

точное земледелие, дифференцированное внесение пестицидов и удобрений, беспилотные летательные аппараты, GERT-сетевое моделирование, транспортно-технологический цикл, автономное планирование маршрутов, временные операционные затраты.

ABSTRACT

В статье рассматриваются алгоритм и вычислительный эксперимент GERT-сетевого моделирования транспортно-технологического цикла беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при дифференцированном внесении пестицидов и удобрений в системе точного земледелия. Предложен подход, в рамках которого GERT-сеть используется для формализации полного цикла «зондирование – анализ – принятие решения – обработка участка – визуализация» с участием двух типов БПЛА: для мониторинга состояния почвы и для внесения рабочих растворов. Разработана программная реализация, взаимодействующая с моделируемыми датчиками, спутниковыми и наземными компонентами агротехнологической системы и обеспечивающая имитацию поэтапного движения БПЛА, изменения состояний участков поля и формирования управляющих воздействий. На основе вычислительного эксперимента выполнен анализ распределения временных операционных затрат для нескольких типов опрыскивающих БПЛА и их суточной производительности по площади обслуживаемого участка, показано, что автономное GERT-планирование маршрутов позволяет снизить суммарные временные затраты на выполнение полётных заданий примерно в 2-3 раза по сравнению с ручным управлением, что соответствует экономии порядка 50–70% операционного времени. Полученные результаты подтверждают эффективность применения GERT-сетевых моделей для синтеза и верификации адаптивных систем управления парком сельскохозяйственных БПЛА и оптимизации использования пестицидов и удобрений в условиях точного земледелия.

Введение. Современные технологии точного земледелия предъявляют повышенные требования к качеству и оперативности выполнения агротехнических мероприятий, в том числе к дифференцированному внесению пестицидов и минеральных удобрений на основе фактического состояния почвы и посевов [1-3]. В этих условиях беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся ключевым элементом агротехнологических систем, обеспечивая мониторинг, зондирование и целенаправленную обработку полей по заранее заданным цифровым картам и программам обработки [4]. Однако рост сложности транспортно-технологических циклов (ТТЦ) БПЛА сопровождается увеличением неопределённости, рисков простоев и потерь производительности, что требует применения адекватных методов математического моделирования и анализа [5].

Классические сетевые методы планирования, такие как PERT и CPM, позволяют описывать детерминированные процессы, но оказываются недостаточно гибкими при наличии стохастических структур, циклов, возвратов и ветвлений, характерных для эксплуатации БПЛА в реальных производственных условиях. В отличие от них, метод GERT (Graphical Evaluation and Review Technique)

© Д.И. Ковалев

предусматривает вероятность прохождения дуг и распределения длительности операций, что делает его удобным инструментом для описания сложных ТТЦ с учётом вероятностной природы отказов, повторных пролетов, дополнительных операций зондирования и обработки [6]. Применение GERT-сетевых моделей к задачам точного земледелия позволяет формализовать логику функционирования БПЛА как элемента киберфизической агросистемы, объединяющей датчики, спутниковые и наземные компоненты, а также интеллектуальные системы поддержки принятия решений.

В контексте дифференцированного внесения пестицидов и удобрений ТТЦ БПЛА включает последовательность взаимосвязанных операций: сбор данных о состоянии агроценозов, зондирование и мониторинг почвы, обработку и анализ информации, выработку управляющих воздействий и выполнение полётных заданий по внесению рабочих растворов в локальные зоны поля [7]. При этом на каждом этапе возможны различные сценарии развития процесса, связанные с изменением состояния почвы (хорошее, среднее, плохое), необходимостью повторных облётов, корректировкой маршрутов, а также с ограничениями по ресурсам БПЛА и условиям эксплуатации. Учитывая, что эффективность применения БПЛА определяется не только разовой производительностью, но и совокупными временными и операционными затратами на полный цикл «зондирование – анализ – принятие решения – обработка участка – визуализация», задача их стохастического анализа и оптимизации приобретает особую значимость.

В последние годы предложен ряд подходов к GERT-сетевому моделированию ТТЦ БПЛА, направленных на оценку рисков простоев, анализ потерь производительности во времени и минимизацию затрат на выполнение полётных заданий в системе точного земледелия [8, 9]. Такие модели рассматривают ТТЦ как ациклические или квазиациклические GERT-сети с выделенными истоком и стоками, что создаёт основу для разработки алгоритмов выбора оптимальной реализации цикла с учётом конкретных производственных ситуаций на поле. Вместе с тем существующие работы в большей степени ориентированы либо на обобщённый анализ рисков, либо на статические показатели эффективности, тогда как практическая задача интеграции алгоритмов маршрутизации и управления БПЛА в имитационную среду, отражающую реальную логику функционирования агротехнологической системы, остаётся актуальной.

В данной работе рассматривается алгоритм и вычислительный эксперимент GERT-сетевого моделирования транспортно-технологического цикла БПЛА при дифференцированном внесении пестицидов и удобрений, реализующий полный цикл взаимодействия двух типов БПЛА: для мониторинга состояния почвы и для внесения препаратов. Предлагаемая программная реализация следует логике работы всех элементов агротехнологической системы, включая сбор и обработку данных, принятие решений о целесообразности обработки, формирование и реализацию полётных заданий, а также визуализацию состояния поля и маршрутов движения БПЛА. Разработанное модельно-алгоритмическое обеспечение ориентировано на снижение временных операционных затрат ТТЦ БПЛА и повышение точности локального воздействия, что в конечном итоге способствует оптимизации использования химических средств и повышению эффективности процессов точного земледелия.

Таким образом, особенностью предлагаемого подхода является то, что для описания технологического процесса внесения пестицидов и удобрений используются GERT-сетевые модели, которые учитывают все взаимосвязанные операции, начиная от мониторинга и зондирования до внесения удобрений.

Материалы и методы. В качестве материалов и методов используется описание состава и структуры агротехнологической системы, реализующей технологию дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с использованием двух типов сельскохозяйственных БПЛА, на базе которых

© Д.И. Ковалев

разрабатываются применяемые программные и алгоритмические средства GERT-сетевого моделирования
транспортно-технологического цикла. Это осуществляется на основе обобщённого алгоритма функционирования системы, включающем этапы зондирования и мониторинга состояния почвы и агроценозов, обработки и анализа данных, принятия решений о целесообразности обработки, формирования полётных заданий и выполнения локального внесения препаратов с привязкой к координатам опорной GPS-станции. Особое внимание уделяется логике взаимодействия БПЛА, наземной станции и средств визуализации, что позволяет имитировать пошаговое выполнение операций в рамках GERT-сетевой модели и оценивать эффективность различных сценариев использования БПЛА в условиях точного земледелия.

Для реализации технологии дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с использованием БПЛА, разработана программа, которая следует логике работы всех элементов агротехнологической системы, взаимодействуя с БПЛА, различными датчиками, спутниковыми и наземными компонентами системы.

Обобщенный алгоритм включает следующие этапы:

- Шаг 1. Сбор данных с сельскохозяйственного поля.
- Шаг 2. Зондирование и мониторинг почвы с использованием БПЛА.
- Шаг 3. Сбор данных о состоянии агроценозов (поля).
- Шаг 4. Обработка и анализ данных.
- Шаг 5. Определение потребностей в удобрениях и пестицидах для каждого участка поля.
- Шаг 6. Доставка нужных препаратов с использованием второго БПЛА для внесения удобрений и пестицидов.
- Шаг 7. Согласование с координатами наземной опорной GPS-станции для точности внесения.

Процесс работы программы состоит из следующих базовых этапов:

- Этап 1 - зондирование. Первый БПЛА (для мониторинга состояния почвы) перемещается на поле, собирает данные о состоянии почвы и передает их на наземную станцию для анализа.
- Этап 2 - анализ данных. Наземная станция анализирует полученные данные о почве и определяет, нужно ли вносить удобрения или пестициды (по состоянию почвы: хорошее, плохое или среднее).
- Этап 3 - внесение удобрений или пестицидов. Второй БПЛА (для внесения веществ) загружается необходимым количеством удобрений или пестицидов и перемещается на нужные участки для их внесения в соответствии с анализом состояния поля.

Сначала первый БПЛА (тип 3 – для мониторинга) перемещается на участок поля и собирает данные о состоянии почвы (случайно выбирается одно из состояний: "плохое", "хорошее" или "среднее"). Затем данные передаются в блок анализа, который обрабатывает полученную информацию. Если состояние почвы плохое или среднее, будет принято решение о внесении удобрений или пестицидов.

Второй БПЛА (тип 4 – для внесения удобрений) загружается нужными веществами, перемещается на тот же участок и вносит препараты. Этот процесс повторяется для всех нуждающихся в обработке участков поля.

Программа моделирует технологию использования БПЛА для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с учетом состояния почвы на различных участках поля. Ожидаемый результат – точное и эффективное применение удобрений и пестицидов в зависимости от состояния почвы, что способствует улучшению агрономических процессов и оптимизации использования химических веществ.

Результаты и обсуждение. Алгоритм и вычислительный эксперимент GERT-сетевого моделирования для описания транспортно-

© Д.И. Ковалев

технологического цикла БПЛА при внесении пестицидов и удобрений предназначены для анализа полученных результатов вычислительного эксперимента и демонстрации работоспособности предлагаемого алгоритма GERT-сетевого моделирования ТТЦ БПЛА, а также подтверждения адекватности процесса имитации ключевых этапов цикла «зондирование – анализ – принятие решения – обработка участка – визуализация» в условиях точного земледелия. На основе программной реализации удается проследить поэтапное движение БПЛА, изменение состояния участков поля и формирование управляющих воздействий, а также количественно оценить распределение временных операционных затрат для различных типов БПЛА с привязкой к обслуживаемой площади участка. В данном разделе сопоставляются результаты моделирования для нескольких конфигураций БПЛА, анализируется влияние структуры ТТЦ и параметров маршрутизации на суммарные временные затраты и показывается потенциал снижения продолжительности выполнения задач в 2–3 раза по сравнению с ручным управлением.

Основная логика программы представлена на рис. 1. При реализации программы выполняются следующие этапы:

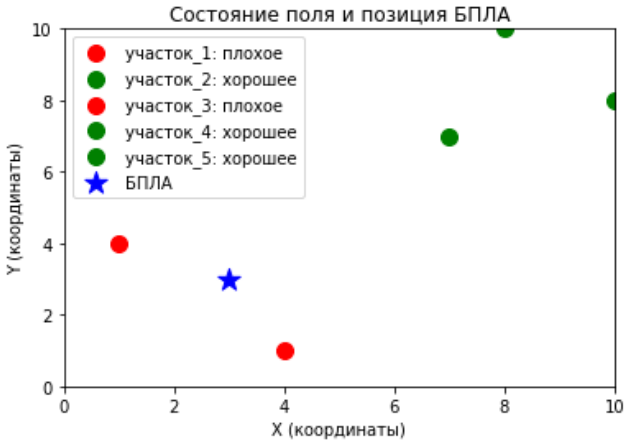
- Программа моделирует перемещение БПЛА на поле.
- БПЛА для мониторинга собирает данные о состоянии почвы.
- Данные передаются на наземную станцию для анализа.
- В зависимости от анализа, принимается решение о внесении удобрений/пестицидов.
- БПЛА для внесения перемещается на нужный участок и применяет вещества.
- Поле отображается с помощью scatter, где каждый участок имеет цвет в зависимости от состояния почвы: зеленый - хорошее состояние; желтый - среднее состояние; красный - плохое состояние.



1-рис. Логика программы

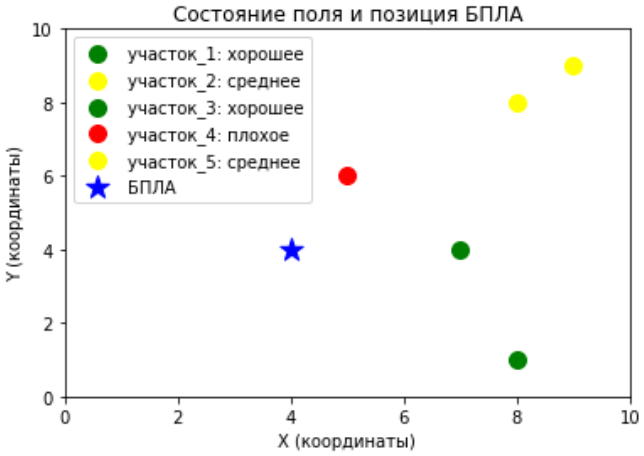
Позиция БПЛА отображается синим маркером в виде звезды. Можно визуализировать текущие координаты БПЛА и состояние поля.

© Д.И. Ковалев



2-рис. Схема А отображения состояния поля и маршрутов движения БПЛА при мониторинге и обработке сельскохозяйственных участков

Схема на рисунке 2 показывает дискретное состояние сельскохозяйственного поля, разделённого на участки, с цветовой индикацией качества почвы («плохое», «среднее», «хорошее»), а также траекторию движения БПЛА при выполнении мониторинга и обработки. Положение БПЛА в каждый момент времени обозначено синим маркером в виде звезды, что позволяет визуализировать последовательное перемещение аппарата в точки (4; 6), (9; 4) и (3; 3), фиксацию плохого состояния почвы на отдельных участках и факт внесения пестицидов/удобрений в координатах (9; 4) при одновременной индикации участков, не требующих обработки.



3-рис. Схема Б отображения состояния поля и маршрутов движения БПЛА при мониторинге и обработке сельскохозяйственных участков

Схема на рисунке 3 иллюстрирует альтернативный сценарий работы системы, в котором отображаются маршруты движения БПЛА по полю, состояния отдельных участков и результаты принятия решений о необходимости обработки. Синим маркером-звездой показано перемещение БПЛА в точки (4; 2), (9; 3), (3; 2) и (4; 4) с фиксацией хорошего и среднего состояния почвы, причём обработка выполняется только в координатах (3; 2), тогда как участки, не требующие вмешательства, явно выделены, что демонстрирует селективный характер внесения пестицидов и удобрений.

Таким образом, программа позволяет эффективно моделировать систему управления сельскохозяйственными БПЛА. Демонстрируется поэтапное движение БПЛА, сбор данных, принятие решений о целесообразности внесения удобрений/пестицидов и отображение обработанных зон. На графике видны участки, на которых применялись препараты, а также информация об участках, не требующих обработки.

По результатам испытаний в Таблице 1 показано процентное соотношение временных операционных затрат ТТЦ БПЛА трех типов с привязкой к ежедневно обслуживаемой площади участка опрыскивающего БПЛА [10-12].

Таблица 1.

Тип БПЛА	ПГ (%)	ИО (%)	ПМ (%)	НО (%)	ЧО (%)	$S_{уч}$ (га)
3WQF120-12	9.56	3.73	9.75	47.03	29.93	18.0
3CD-15	7.60	3.42	9.84	52.14	27.00	16.7
WSZ-0610	8.37	4.36	10.37	48.96	27.94	13.4

Представленные в таблице 1 результаты испытаний отражают распределение временных операционных затрат в транспортно-технологическом цикле для нескольких типов опрыскивающих БПЛА, а также их фактическую суточную производительность по площади обслуживаемого участка (в гектарах) [13]. На

(cc) BY © Д.И. Ковалев

основе процентных долей по операциям (подготовка к работе, вспомогательные и переходные процессы, перемещение, наземное обслуживание, чистое выполнение полётного задания) можно проанализировать, какие стадии цикла формируют наибольшие потери времени и где применение GERT-сетевого планирования маршрутов даёт максимальный эффект [14]. Указанное снижение суммарных временных затрат на 2–3 раза при переходе от ручного управления к автономному планированию маршрута фактически означает экономию порядка 50–70% операционного времени и, следовательно, рост пропускной способности парка БПЛА при обработке сельскохозяйственных угодий. Модель БПЛА типа 3WQF120-12 характеризуется относительно высокой долей времени, приходящегося на наземное обслуживание (заправка, подготовка, регламентные операции), при достаточно сбалансированных затратах на подготовительные операции и перемещение, что в сочетании с суточной площадью обработки около 18 га указывает на ориентацию данного БПЛА на интенсивную, но устойчивую работу на средних и крупных полях. Для БПЛА типа 3CD-15 отмечается несколько иная структура временных затрат: доля наземного обслуживания распределена более равномерно по отношению к подготовке и перемещению, а обслуживаемая площадь составляет порядка 16,7 га в сутки, что может свидетельствовать о более рациональном использовании времени при корректно настроенных маршрутах и режимах загрузки. Платформа на базе БПЛА WSZ-0610 имеет несколько большую долю времени на перемещение и вспомогательные операции при суточной производительности около 13,4 га, что делает её более чувствительной к нерациональной маршрутизации, но одновременно демонстрирует высокий потенциал выигрыша от применения автономного GERT-планирования, так как сокращение лишних перегонов и возвратов даёт здесь особенно заметный эффект.

В совокупности анализ этих трёх типов БПЛА показывает, что внедрение разработанного модельно-алгоритмического обеспечения позволяет перераспределить временные ресурсы в пользу чистого полётного времени, минимизируя долю вспомогательных и неэффективных операций, что и обеспечивает существенную экономию общего времени выполнения задач.

Заключение. Разработанный алгоритм, программное обеспечение и проведенный вычислительный эксперимент GERT-сетевого моделирования ТТЦ БПЛА продемонстрировали возможность формализованного описания полного цикла «зондирование – анализ – принятие решения – обработка участка – визуализация» для задач дифференцированного внесения пестицидов и удобрений. На уровне модели обеспечено согласованное взаимодействие двух типов БПЛА (мониторинг и внесение), наземной станции и средств визуализации, что позволяет прослеживать логику функционирования агротехнологической системы в дискретном пространственно-временном представлении и учитывать вероятностный характер состояний почвы и необходимости обработки.

Проведённый вычислительный эксперимент подтвердил, что использование GERT-сетевого подхода и автономного планирования маршрутов позволяет существенно снизить суммарные временные затраты на выполнение полётных заданий по сравнению с ручным управлением, обеспечивая сокращение продолжительности цикла ориентировочно в 2–3 раза, что эквивалентно экономии порядка 50–70% операционного времени. Анализ распределения временных операционных затрат для трёх типов опрыскивающих БПЛА показал, что наибольший резерв повышения эффективности связан с оптимизацией этапов перемещения, вспомогательных операций и наземного обслуживания, а также с повышением доли чистого полётного времени, непосредственно связанного с обработкой участков.

Построенные схемы визуализации состояния поля и маршрутов движения БПЛА продемонстрировали практическую применимость предложенного подхода для поддержки принятия решений при точном земледелии, включая выбор участков, требующих обработки, и оценку эффекта от дифференцированного внесения препаратов.

© Д.И. Ковалев

Моделирование показало, что селективная обработка, основанная на фактическом состоянии почвы и посевов, позволяет снизить избыточное использование пестицидов и удобрений, одновременно повышая точность локального воздействия и потенциал устойчивого развития агросистем.

Полученные результаты создают основу для дальнейшего развития модельно-алгоритмического обеспечения управления парком БПЛА, включая интеграцию более детализированных стохастических характеристик ТТЦ, учёт погодных и производственных ограничений, а также расширение набора критериев оптимальности (стоимостные, энергетические, экологические показатели). Перспективным направлением является также сопряжение GERT-сетевых моделей с системами оперативного диспетчерского управления и цифровыми платформами точного земледелия, что позволит использовать результаты моделирования в режиме близком к реальному времени для адаптивного планирования и перестройки маршрутов БПЛА при изменении условий на поле.

Список использованной литературы

1. Марченко Л.А., Личман Г.И., Смирнов И.Г., Мочкова Т.В., Колесникова В.А. Дифференцированное внесение удобрений и пестицидов с использованием беспилотных летательных аппаратов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 3. – С. 17–23. – DOI: 10.22314/2073-7599-2017-3-17-23.
2. Астахов В.С., Иванчиков Г.О. Проблемы применения систем точного земледелия при дифференцированном внесении твёрдых минеральных удобрений и пути их решения // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 1. – С. 133–136.
3. Ковалев Д.И. Интеграция БПЛА в системы точного высева: перспективные подходы для совершенствования сеялок в умном земледелии / Д.И. Ковалев // Достижения науки и технологий (ДНИТ-IV-2025): сб. науч. ст. по материалам IV Всерос. (нац.) науч. конф., Красноярск, 27–28 февр. 2025 г. – Красноярск: Красноярский краевой Дом науки и техники РОНИОО, 2025. – С. 273–283. – DOI: 10.47813/dnit.4.2025.3012. – EDN: KEJLIU.
4. Velusamy P., Rajendran S., Mahendran R.K., Naseer S., Shafiq M., Choi J.-G. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Precision Agriculture: Applications and Challenges // Energies. – 2022. – Vol. 15. – Art. 217.
5. Ковалев Д.И., Подоплелова В.А., Мансурова Т.П. GERT-анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов // Информатика. Экономика. Управление – Informatics. Economics. Management. – 2022. – Т. 1, № 1. – С. 0110–0120. – DOI: 10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120.
6. Pregina K., Ramesh Kannan M. Stochastic Project Network Scheduling Technique for Construction Projects Using GERT // In: Loon L.Y., Subramaniyan M., Gunasekaran K. (eds) Advances in Construction Management. Lecture Notes in Civil Engineering. – Singapore: Springer, 2022. – Vol. 191. – DOI: 10.1007/978-981-16-5839-6_33.
7. Ковалев Д.И., Астанакулов К.Д. Обзорный анализ БПЛА сельскохозяйственного назначения // Информатика. Экономика. Управление. – 2024. – Т. 3, № 4. – С. 101–127. – DOI: 10.47813/2782-5280-2024-3-4-0101-0127. – EDN: MGAEWJ.
8. Performance analysis of UAV sprayer application in precision agriculture / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, K.D. Astanakulov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1231, No. 1. – P. 012057. – DOI: 10.1088/1755-1315/1231/1/012057. – EDN: XJHWPM.
9. Ковалев И.В., Ковалев Д.И., Астанакулов К.Д. [и др.] К вопросу минимизации затрат в GERT-сетевых моделях транспортно-технологических циклов БПЛА // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, № 2(41). – С. 30–31. – DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.014. – EDN: RYOYMW.

(cc) BY © Д.И. Ковалев

10. Чжао Ци. Последние развития отрасли БПЛА для защиты растений Китая // StudNet. – 2021. – Т. 4, № 7. – С. 1024–1037.
11. Мамычев А.Ю., Склярова С.А. Цифровизация и роботизация сельского хозяйства в современном Китае: основные приоритеты, направления инновационной политики государства // Advances in Law Studies. – 2020. – № 5. – С. 139–155. – DOI: 10.29039/2409-5087-2020-8-5-139-155 (дата обращения: 11.01.2026).
12. Ли Лю, Ким А.А. Применение дронов в сельском хозяйстве Китая // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2019. – Т. 11, № 4. – С. 54–61.
13. Ковалев И.В., Шапорова З.Е., Ковалев Д.И. Обзорный анализ экспериментальных данных для оценки характеристик БПЛА для опрыскивания посевов в точном земледелии // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2024. – № 11(212). – С. 25–31. – DOI: 10.36718/1819-4036-2024-11-25-31.
14. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, K.D. Astanakulov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1076. – P. 012055.

© Д.И. Ковалев