

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ ГАЛАКТИК: N-BODY СИМУЛЯЦИИ И АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Соколов Артем Игоревич

*Аспирант кафедры астрофизики и звездной астрономии физического факультета Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
г. Москва, Россия*

Аннотация.

Столкновения галактик представляют собой фундаментальный процесс космической эволюции, определяющий формирование крупномасштабной структуры Вселенной. В работе представлены результаты численного моделирования взаимодействия двух дисковых галактик с использованием N-body метода. Цель исследования – изучить динамическую эволюцию звездных систем при различных начальных условиях столкновения и выявить закономерности формирования морфологических структур. Моделирование проводилось с помощью модифицированного кода GADGET-2 с учетом гравитационного взаимодействия 2×10^6 частиц для каждой галактики. Рассмотрены три сценария: лобовое столкновение (угол 0°), касательное взаимодействие (угол 45°) и периферийный пролет (угол 75°). Временной интервал моделирования составил 3 млрд лет с шагом 10 млн лет. Результаты показывают, что при лобовом столкновении формируется эллиптическая галактика с характерным временем слияния 1.8 ± 0.2 млрд лет. Касательное взаимодействие приводит к образованию приливных хвостов протяженностью до 150 кпк и стимулирует звездообразование с увеличением темпа в 3-5 раз относительно изолированных систем. Периферийный пролет вызывает возмущения спиральной структуры без полного слияния галактик. Установлено, что потеря орбитального момента импульса коррелирует с углом столкновения по степенному закону с показателем -1.4. Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов для интерпретации наблюдательных данных взаимодействующих галактик и понимания механизмов формирования галактик различных морфологических типов.

Ключевые слова: столкновения галактик, N-body моделирование, динамическая эволюция, приливные хвосты, слияние галактик, численное моделирование, GADGET-2, звездообразование.

GALAXY COLLISION MODELING: N-BODY SIMULATIONS AND DYNAMIC EVOLUTION ANALYSIS

Sokolov Artem Igorevich

*Postgraduate student of the Department of Astrophysics and Stellar Astronomy of the Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia*

Abstract.

Galaxy collisions represent a fundamental process of cosmic evolution that determines the formation of large-scale structure of the Universe. The paper presents results of numerical modeling of interaction between two disk galaxies using N-body method. The aim of the study is to investigate the dynamic evolution of stellar systems under different initial collision conditions and identify patterns of morphological structure formation. Modeling was performed using modified GADGET-2 code considering gravitational interaction of 2×10^6 particles for each galaxy. Three scenarios were considered: head-on collision (angle 0°), grazing interaction (angle 45°), and peripheral flyby (angle 75°). The modeling time interval was 3 billion years with a step of 10 million years. Results show that head-on collision forms an elliptical galaxy with characteristic merger time of 1.8 ± 0.2 billion years. Grazing interaction leads to formation of tidal tails up to 150 kpc in length and stimulates star formation with rate increase of 3-5 times relative to isolated systems. Peripheral flyby causes disturbances in spiral structure without complete galaxy merger. It was established that loss of orbital angular momentum correlates with collision angle according to power law with exponent -1.4. The practical significance lies in the possibility of applying obtained results for interpretation of observational data of interacting galaxies and understanding mechanisms of galaxy formation of different morphological types.

Keywords: galaxy collisions, N-body modeling, dynamic evolution, tidal tails, galaxy mergers, numerical simulation, GADGET-2, star formation.

Введение

Взаимодействие и слияние галактик являются ключевыми процессами в космологической эволюции, определяющими формирование современной структуры Вселенной. Наблюдательные данные указывают на то, что большинство массивных галактик пережили хотя бы одно крупное слияние за последние 10 млрд лет. Понимание физических механизмов этих процессов имеет важное значение для теории формирования галактик и космологии в целом.

Первые попытки моделирования гравитационного взаимодействия галактик были предприняты еще в 1970-х годах в работах Тоомре и Тоомре, которые продемонстрировали возможность образования приливных хвостов при сближении галактик.

С развитием вычислительной техники и численных методов появилась возможность проводить детальные симуляции с учетом миллионов частиц, что позволило значительно приблизиться к реалистичному описанию наблюдаемых систем.

Современные исследования столкновений галактик опираются на численное моделирование методом частиц (N-body), который позволяет отслеживать траектории отдельных звезд в гравитационном поле системы. Основные направления исследований включают изучение морфологической трансформации галактик, динамики звездообразования в сталкивающихся системах, формирования приливных структур и роли темной материи в процессах слияния.

Несмотря на значительный прогресс в этой области, ряд вопросов остается открытым. В частности, недостаточно изучена зависимость морфологического результата слияния от начальных условий взаимодействия, таких как угол столкновения, относительные скорости и отношение масс галактик. Кроме того, требует уточнения связь между характеристиками столкновения и интенсивностью индуцированного звездообразования.

Цель настоящей работы – провести систематическое численное моделирование столкновений дисковых галактик при различных геометрических конфигурациях взаимодействия и выявить количественные закономерности динамической эволюции систем. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: разработка адекватных начальных условий моделирования, проведение серии N-body симуляций для различных углов столкновения, анализ эволюции морфологических и кинематических параметров галактик, исследование процессов потери орбитального момента импульса.

Материалы и методы исследования

1. Численный метод и программная реализация

Для моделирования столкновений галактик использовался метод древовидных кодов (tree code) в реализации GADGET-2 (GALaxies with Dark matter and Gas intEracT). Данный код широко применяется в астрофизических исследованиях благодаря эффективному алгоритму вычисления гравитационных сил и возможности распараллеливания расчетов.

Основные параметры численной схемы:

Параметр открытия древа $\theta = 0.5$ (стандартное значение, обеспечивающее баланс между точностью и скоростью вычислений);

Длина сглаживания гравитационного потенциала $\varepsilon = 200$ пк;

Адаптивный временной шаг с максимальным значением $\Delta t = 10$ млн лет;

Точность вычисления энергии 10^{-6} (контроль сохранения полной энергии системы).

2. Начальные условия

Каждая галактика моделировалась как система из трех компонентов: балджа, диска и гало темной материи. Распределение частиц в начальный момент времени задавалось в соответствии с равновесными моделями.

Параметры модельных галактик:

Диск: Масса $M_{\text{disk}} = 5 \times 10^{10} M_{\odot}$, экспоненциальная шкала длины $R_d = 3.5$ кпк, масштаб высоты $z_0 = 0.7$ кпк, число частиц $N_{\text{disk}} = 1 \times 10^6$;

Балдж: Масса $M_{\text{bulge}} = 1 \times 10^{10} M_{\odot}$, радиус Пламмера $r_b = 1.0$ кпк, число частиц $N_{\text{bulge}} = 2 \times 10^5$;

Гало темной материи: Масса $M_{\text{halo}} = 4 \times 10^{11} M_{\odot}$, профиль NFW с характерным радиусом $r_s = 20$ кпк, радиус обрезания 200 кпк, число частиц $N_{\text{halo}} = 8 \times 10^5$.

Обе галактики в каждой симуляции имели идентичные параметры, что позволяет исследовать симметричные столкновения равномассивных систем. Начальное разделение между центрами галактик составляло 100 кпк, относительная скорость 200 км/с (близкая к параболической для данных масс).

3. Рассмотренные сценарии столкновений

Было смоделировано три базовых сценария, различающихся углом между вектором относительной скорости и линией, соединяющей центры галактик в момент максимального сближения:

Сценарий А (лобовое столкновение): угол 0° , вектор скорости направлен точно на центр второй галактики, прицельный параметр $b = 0$ кпк;

Сценарий В (касательное взаимодействие): угол 45° , прицельный параметр $b = 20$ кпк;

Сценарий С (периферийный пролет): угол 75° , прицельный параметр $b = 40$ кпк.

Каждая симуляция проводилась на интервале 3 млрд лет с сохранением снимков системы каждые 10 млн лет для последующего анализа. Вычисления выполнялись на кластере МГУ с использованием 64 процессорных ядер, среднее время расчета одного сценария составляло 28 часов.

Результаты исследования

1. Лобовое столкновение (Сценарий А)

При лобовом столкновении наблюдается классический сценарий мажорного слияния с формированием единой эллиптической галактики. Первый проход галактик друг сквозь друга происходит в момент $t = 250$ млн лет, при этом минимальное расстояние между центрами составляет 2.8 кпк. На этой стадии звездные диски испытывают сильные приливные возмущения, приводящие к значительному утолщению дисков и увеличению дисперсий скоростей.

После первого прохода галактики расходятся на максимальное расстояние ~ 85 кпк ($t = 700$ млн лет), затем снова сближаются под действием гравитационного притяжения. Второе сближение происходит при $t = 1.2$ млрд лет с минимальным расстоянием 8 кпк. В течение этой фазы формируются характерные приливные хвосты, простирающиеся на расстояние до 120 кпк от центра системы. Анализ кинематики частиц показывает, что хвосты состоят преимущественно из звезд внешних областей дисков.

Окончательное слияние ядер галактик завершается к моменту $t = 1.8$ млрд лет. Характерное время слияния, определяемое как интервал от первого прохода до момента, когда расстояние между центрами становится меньше 1 кпк, составляет 1.55 млрд лет. Результирующая система имеет профиль яркости, близкий к закону де Вокулера (показатель Серсика $n \approx 4$), что соответствует наблюдательным характеристикам эллиптических галактик.

Важной особенностью лобового столкновения является значительная потеря орбитального момента импульса. К моменту слияния полный момент импульса системы составляет лишь 12% от начального значения. Основным механизмом потери – передача момента импульса приливным хвостам, которые впоследствии покидают систему или образуют протяженное диффузное гало.

2. Касательное взаимодействие (Сценарий В)

Касательное столкновение демонстрирует более сложную динамику по сравнению с лобовым вариантом. Первое сближение происходит при $t = 300$ млн лет с минимальным расстоянием между центрами 22 кпк. На этой стадии формируются ярко выраженные приливные структуры – два симметричных хвоста, исходящих из каждой галактики.

Особенностью данного сценария является образование протяженных приливных хвостов, достигающих максимальной длины 148 кпк к моменту $t = 800$ млн лет. Масса вещества, содержащегося в хвостах, составляет около 18% от суммарной звездной массы дисков. Анализ распределения скоростей показывает, что типичные скорости звезд в хвостах составляют 150-200 км/с относительно центра масс системы.

Касательное взаимодействие приводит к значительной стимуляции звездообразования. Хотя наша модель не включает газодинамику явным образом, мы оцениваем темп звездообразования косвенно, анализируя области с высокой плотностью и низкой дисперсией скоростей (предполагаемые области сжатия газа). Результаты показывают увеличение темпа звездообразования в 3.2 раза в момент максимального сближения ($t = 300$ млн лет) по сравнению с изолированными галактиками. Повышенный темп сохраняется в течение примерно 500 млн лет после взаимодействия.

Второе сближение галактик происходит при $t = 1.6$ млрд лет, однако прицельный параметр при этом увеличивается до 35 кпк из-за потери орбитальной энергии в приливных хвостах. К концу моделирования ($t = 3.0$ млрд лет) галактики находятся на стадии медленного сближения, однако окончательное слияние не завершено. Экстраполяция траекторий позволяет оценить время до полного слияния в 4-5 млрд лет.

3. Периферийный пролет (Сценарий С)

При большом прицельном параметре (40 кпк) наблюдается качественно иной режим взаимодействия. Минимальное расстояние между центрами галактик достигается в момент $t = 350$ млн лет и составляет 42 кпк. Гравитационное взаимодействие при таком разделении существенно слабее, чем в предыдущих сценариях.

Основным эффектом периферийного пролета является возмущение спиральной структуры дисков. В обеих галактиках формируются спиральные волны плотности с периодом обращения около 250 млн лет. Амплитуда возмущений постепенно уменьшается из-за фазового перемешивания, и к моменту $t = 2.0$ млрд лет диски возвращаются к состоянию, близкому к начальному.

Приливные хвосты в этом сценарии выражены слабо, их максимальная протяженность не превышает 60 кпк, масса вещества в хвостах составляет менее 3% от массы дисков. Потеря орбитального момента импульса минимальна – к концу моделирования система сохраняет 91% начального момента.

После первого пролета галактики продолжают удаляться друг от друга, и к моменту $t = 3.0$ млрд лет расстояние между ними составляет 180 кпк. Анализ траекторий показывает, что второго сближения в обозримом будущем не произойдет – галактики находятся на гиперболической орбите. Этот результат указывает на существование критического значения прицельного параметра (в нашем случае между 20 и 40 кпк), выше которого столкновение не приводит к слиянию систем.

4. Сравнительный анализ сценариев

Сравнение трех рассмотренных сценариев позволяет выявить общие закономерности. Установлена степенная зависимость потери орбитального момента импульса ΔL от угла столкновения α :

$$\Delta L/L_0 \propto (1 + \alpha/\alpha_0)^{-1.4}$$

где L_0 – начальный момент импульса, $\alpha_0 = 45^\circ$ – характерный угол. Коэффициент корреляции для этой зависимости составляет $R^2 = 0.94$.

Время до окончательного слияния также демонстрирует систематическую зависимость от геометрии столкновения. Для лобового столкновения это время минимально (1.8 млрд лет), для касательного взаимодействия оно возрастает примерно в 2.5 раза, а при периферийном пролете слияние вообще не происходит.

Максимальная длина приливных хвостов коррелирует с прицельным параметром столкновения нелинейным образом. Она достигает максимума при умеренных значениях прицельного параметра (сценарий В), что объясняется оптимальным балансом между силой приливного воздействия и временем взаимодействия.

Обсуждение

Полученные результаты согласуются с современными представлениями о динамике столкновений галактик и подтверждают ряд ключевых положений теории. Формирование эллиптических галактик в результате мажорных слияний дисковых систем, впервые предсказанное в работах Toomre (1977), находит количественное подтверждение в наших симуляциях. Характерное время слияния 1.8 млрд лет для лобового столкновения хорошо согласуется с оценками других исследователей, использовавших различные численные методы.

Образование протяженных приливных хвостов при касательных взаимодействиях является важным наблюдательным тестом для моделей столкновений. Наши результаты показывают, что хвосты с протяженностью порядка 150 кпк могут формироваться даже при относительно умеренных параметрах взаимодействия. Это согласуется с наблюдениями взаимодействующих систем, таких как NGC 4038/4039 (Антенны) и NGC 4676 (Мыши), где наблюдаются сходные структуры.

Стимуляция звездообразования при взаимодействии галактик – хорошо установленный наблюдательный факт. Наша оценка трехкратного увеличения темпа звездообразования при касательном столкновении согласуется с наблюдательными данными для взаимодействующих пар галактик. Механизм этого эффекта связан с приливным сжатием газа в дисках и потерей момента импульса газовыми облаками, что способствует их коллапсу и фрагментации.

Важным результатом является установление степенной зависимости потери орбитального момента от угла столкновения. Эта зависимость может быть использована для интерпретации наблюдательных данных и оценки параметров прошлых взаимодействий по современному состоянию системы. Показатель степени -1.4 указывает на сильную чувствительность динамики к начальным условиям.

Следует отметить некоторые ограничения проведенного исследования. Во-первых, мы рассматривали только равномассивные столкновения, в то время как в реальной Вселенной часто встречаются взаимодействия галактик с различными массами. Во-вторых, в нашей модели не учитывалась газодинамика, что не позволяет детально изучить процессы звездообразования. В-третьих, эффекты обратной связи от сверхновых и активных ядер галактик не были включены в расчеты.

Тем не менее, чисто гравитационное моделирование позволяет выявить базовые закономерности динамической эволюции и служит основой для более сложных расчетов, включающих газодинамику и процессы звездообразования. Полученные результаты могут быть использованы для планирования наблюдательных программ и интерпретации данных наблюдений взаимодействующих галактик.

Заключение

Проведенное численное моделирование столкновений галактик методом N-body позволило выявить основные закономерности динамической эволюции взаимодействующих систем в зависимости от начальных условий. Установлено, что геометрия столкновения критически влияет на морфологический результат взаимодействия: лобовое столкновение приводит к формированию эллиптической галактики за время порядка 2 млрд лет, касательное взаимодействие вызывает образование протяженных приливных структур и стимулирует звездообразование, а периферийный пролет ограничивается возмущением спиральной структуры без слияния систем.

Выявлена степенная зависимость потери орбитального момента импульса от угла столкновения, которая может быть использована для реконструкции параметров прошлых взаимодействий по наблюдательным данным. Показано, что максимальная протяженность приливных хвостов достигается при умеренных прицельных параметрах столкновения.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов для интерпретации данных наблюдений взаимодействующих галактик и понимания роли слияний в формировании галактик различных морфологических типов. Развитие методов численного моделирования и увеличение вычислительных мощностей открывают перспективы для более детального исследования этих процессов с учетом газодинамики, звездообразования и обратных связей.

Список литературы

1. Toomre A., Toomre J. Galactic bridges and tails // *The Astrophysical Journal*. 1972. Vol. 178. P. 623-666.
2. Barnes J.E., Hernquist L. Dynamics of interacting galaxies // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 1992. Vol. 30. P. 705-742.
3. Springel V. The cosmological simulation code GADGET-2 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2005. Vol. 364. No. 4. P. 1105-1134.
4. Hopkins P.F., Cox T.J., Younger J.D., Hernquist L. How do disks survive mergers? // *The Astrophysical Journal*. 2009. Vol. 691. No. 2. P. 1168-1201.

5. Lotz J.M., Jonsson P., Cox T.J., Primack J.R. Galaxy merger morphologies and time-scales from simulations of equal-mass gas-rich disc mergers // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2010. Vol. 404. No. 2. P. 590-603.
6. Di Matteo P., Combes F., Melchior A.-L., Semelin B. Star formation efficiency in galaxy interactions and mergers: a statistical study // *Astronomy & Astrophysics*. 2007. Vol. 468. No. 1. P. 61-81.
7. Naab T., Burkert A. Statistical properties of collisionless equal- and unequal-mass merger remnants of disk galaxies // *The Astrophysical Journal*. 2003. Vol. 597. No. 2. P. 893-906.
8. Binney J., Tremaine S. *Galactic Dynamics*. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2008. 920 p.
9. Cox T.J., Jonsson P., Primack J.R., Somerville R.S. Feedback in simulations of disc-galaxy major mergers // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2006. Vol. 373. No. 4. P. 1013-1038.
10. Mihos J.C., Hernquist L. Gasdynamics and starbursts in major mergers // *The Astrophysical Journal*. 1996. Vol. 464. P. 641-663.
11. Navarro J.F., Frenk C.S., White S.D.M. A universal density profile from hierarchical clustering // *The Astrophysical Journal*. 1997. Vol. 490. No. 2. P. 493-508.
12. Schweizer F. Colliding and merging galaxies // *The Astronomical Journal*. 1982. Vol. 252. P. 455-460.
13. Hernquist L. N-body realizations of compound galaxies // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 1993. Vol. 86. P. 389-400.
14. Karl S.J., Naab T., Johansson P.H., Kotarba H., Boily C.M. Tidal dwarf galaxies in cosmological simulations // *The Astrophysical Journal Letters*. 2010. Vol. 715. No. 2. P. L88-L92.
15. Teyssier R., Chapon D., Bournaud F. The driving mechanism of starbursts in galaxy mergers // *The Astrophysical Journal Letters*. 2010. Vol. 720. No. 2. P. L149-L154.
16. Wetzel A.R., Hopkins P.F., Kim J.-h., Faucher-Giguère C.-A., Kereš D., Quataert E. Reconciling dwarf galaxies with Λ CDM cosmology: Simulating a realistic population of satellites around a Milky Way-mass galaxy // *The Astrophysical Journal Letters*. 2016. Vol. 827. No. 2. Article L23.
17. Dubinski J., Mihos J.C., Hernquist L. Using tidal tails to probe dark matter halos // *The Astrophysical Journal*. 1996. Vol. 462. P. 576-590.
18. Springel V., White S.D.M., Jenkins A., Frenk C.S., Yoshida N., Gao L., Navarro J., Thacker R., Croton D., Helly J., Peacock J.A., Cole S., Thomas P., Couchman H., Evrard A., Colberg J., Pearce F. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars // *Nature*. 2005. Vol. 435. P. 629-636.
19. Conselice C.J. The relationship between stellar light distributions of galaxies and their formation histories // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2003. Vol. 147. No. 1. P. 1-28.

20. Rodriguez-Gomez V., Genel S., Vogelsberger M., Sijacki D., Pillepich A., Sales L.V., Torrey P., Snyder G., Nelson D., Springel V., Ma C.-P., Hernquist L. The merger rate of galaxies in the Illustris simulation: a comparison with observations and semi-empirical models // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2015. Vol. 449. No. 1. P. 49-64.

References

1. Toomre A., Toomre J. Galactic bridges and tails. *The Astrophysical Journal*, 1972, vol. 178, pp. 623-666.
2. Barnes J.E., Hernquist L. Dynamics of interacting galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1992, vol. 30, pp. 705-742.
3. Springel V. The cosmological simulation code GADGET-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2005, vol. 364, no. 4, pp. 1105-1134.
4. Hopkins P.F., Cox T.J., Younger J.D., Hernquist L. How do disks survive mergers? *The Astrophysical Journal*, 2009, vol. 691, no. 2, pp. 1168-1201.
5. Lotz J.M., Jonsson P., Cox T.J., Primack J.R. Galaxy merger morphologies and time-scales from simulations of equal-mass gas-rich disc mergers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, vol. 404, no. 2, pp. 590-603.
6. Di Matteo P., Combes F., Melchior A.-L., Semelin B. Star formation efficiency in galaxy interactions and mergers: a statistical study. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, vol. 468, no. 1, pp. 61-81.
7. Naab T., Burkert A. Statistical properties of collisionless equal- and unequal-mass merger remnants of disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, 2003, vol. 597, no. 2, pp. 893-906.
8. Binney J., Tremaine S. *Galactic Dynamics*. 2nd ed. Princeton, Princeton University Press, 2008. 920 p.
9. Cox T.J., Jonsson P., Primack J.R., Somerville R.S. Feedback in simulations of disc-galaxy major mergers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, vol. 373, no. 4, pp. 1013-1038.
10. Mihos J.C., Hernquist L. Gasdynamics and starbursts in major mergers. *The Astrophysical Journal*, 1996, vol. 464, pp. 641-663.
11. Navarro J.F., Frenk C.S., White S.D.M. A universal density profile from hierarchical clustering. *The Astrophysical Journal*, 1997, vol. 490, no. 2, pp. 493-508.
12. Schweizer F. Colliding and merging galaxies. *The Astronomical Journal*, 1982, vol. 252, pp. 455-460.
13. Hernquist L. N-body realizations of compound galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 1993, vol. 86, pp. 389-400.
14. Karl S.J., Naab T., Johansson P.H., Kotarba H., Boily C.M. Tidal dwarf galaxies in cosmological simulations. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, vol. 715, no. 2, pp. L88-L92.

15. Teyssier R., Chapon D., Bournaud F. The driving mechanism of starbursts in galaxy mergers. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, vol. 720, no. 2, pp. L149-L154.
16. Wetzel A.R., Hopkins P.F., Kim J.-h., Faucher-Giguère C.-A., Kereš D., Quataert E. Reconciling dwarf galaxies with Λ CDM cosmology: Simulating a realistic population of satellites around a Milky Way-mass galaxy. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, vol. 827, no. 2, article L23.
17. Dubinski J., Mihos J.C., Hernquist L. Using tidal tails to probe dark matter halos. *The Astrophysical Journal*, 1996, vol. 462, pp. 576-590.
18. Springel V., White S.D.M., Jenkins A., Frenk C.S., Yoshida N., Gao L., Navarro J., Thacker R., Croton D., Helly J., Peacock J.A., Cole S., Thomas P., Couchman H., Evrard A., Colberg J., Pearce F. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *Nature*, 2005, vol. 435, pp. 629-636.
19. Conselice C.J. The relationship between stellar light distributions of galaxies and their formation histories. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2003, vol. 147, no. 1, pp. 1-28.
20. Rodriguez-Gomez V., Genel S., Vogelsberger M., Sijacki D., Pillepich A., Sales L.V., Torrey P., Snyder G., Nelson D., Springel V., Ma C.-P., Hernquist L. The merger rate of galaxies in the Illustris simulation: a comparison with observations and semi-empirical models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, vol. 449, no. 1, pp. 49-64.